

Tesis Doctoral

Gestión automatizada de la interrupción del suministro en redes de distribución eléctrica

Autor: Manuel Rodríguez Montañés

Tutor/Director: Dr. José Antonio Rosendo Macías

Director: Dr. Antonio Gómez Expósito

Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla



Sevilla, 2020

Programa de Doctorado Interuniversitario en Sistemas de Energía Eléctrica



eman ta zabal zazu

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-aaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-aaaf-b94f-d960

Tesis Doctoral

Programa de Doctorado Interuniversitario en Sistemas de Energía Eléctrica

Gestión automatizada de la interrupción del suministro en redes de distribución eléctrica

Autor:

Manuel Rodríguez Montañés

Tutor / Director:

José Antonio Rosendo Macías

Catedrático de Universidad

Director:

Antonio Gómez Expósito

Catedrático de Universidad

Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

2020

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

Tesis Doctoral: Gestión automatizada de la interrupción del suministro en redes de distribución eléctrica

Autor: Manuel Rodríguez Montañés
Tutor/Director: Dr. José Antonio Rosendo Macías
Director: Dr. Antonio Gómez Expósito

El tribunal nombrado para juzgar la Tesis arriba indicada, compuesto por los siguientes doctores:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

¡Por la Horda!

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

Resumen

Cualquier interrupción del suministro eléctrico originada por un fallo permanente en la red de distribución, debe ser detectada por el operador del sistema y gestionada diligentemente para reducir su duración tanto como sea posible. El cumplimiento de unos niveles adecuados de continuidad del suministro normalmente reporta a las distribuidoras mayores ingresos por la realización de su actividad. Esta señal económica ha impulsado que las distribuidoras eléctricas mejoren los procedimientos de registro de sus incidencias, identificación de los procesos que la afectan e incorporen soluciones en la planificación, mantenimiento y operación de las redes.

La progresiva introducción de dispositivos que permiten detectar la existencia de un defecto y la automatización y control remoto de actuaciones, han permitido mejorar los tiempos de reacción y actuación de los procedimientos operativos en la gestión de incidentes. Adicionalmente, la reciente integración en las redes de distribución de los equipos de medida inteligentes, posibilitan la adquisición de información sobre el estado de la alimentación de los suministros de forma bidireccional. Esta creciente disponibilidad de información debe ser debidamente gestionada considerando otros factores como la variabilidad en la configuración de las redes y el estado operativo de la generación distribuida, entre otros, lo que hace necesaria la utilización de procedimientos sistemáticos para la gestión eficiente de las interrupciones.

En este trabajo se presenta una metodología que puede resultar útil al operador de la red como herramienta en tiempo real en la gestión de incidencias en redes radiales de media tensión, para reducir los tiempos de indisponibilidad del suministro. La exposición del procedimiento metodológico, que puede ser abordado

III

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-aaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-aaaf-b94f-d960

con técnicas clásicas, como es el caso de la inspección topológica, es acompañado de un planteamiento matemático para su implementación. Se emplea información estática correspondiente a la conectividad eléctrica de un circuito eléctrico, la ubicación en él de dispositivos de protección, señalización y seccionamiento, los centros de distribución desde los que se alimenta a los suministros y la generación distribuida, así como los atributos que caracterizan cada elemento del circuito. Adicionalmente, se considera la información dinámica de la que dispone el operador en cada momento sobre los eventos que suceden en el circuito.

La metodología presentada se inicia cuando el operador de la red recibe alguna alerta de la existencia de una interrupción, que puede proceder de la señalización de dispositivos instalados en el circuito (protecciones o detectores de paso de falta) o bien ser los clientes afectados los que reclamen su interrupción. El procedimiento sistemático presentado permitirá detectar a partir de la información recibida la existencia de una interrupción, considerando la posibilidad de reconexiones automáticas cuando los dispositivos lo permitan.

En el caso de que el estado del circuito, normal o interrumpido, no pueda ser inequívocamente identificado con la información disponible, se orienta al operador de la red para realizar consultas sobre el estado de alimentación de los suministros como recurso adicional para obtener información útil. Esta información puede ser obtenida consultando directamente a los clientes o a los equipos de medida telegestionados.

Una vez se ha detectado la interrupción del suministro en un circuito, toda la información adquirida por el operador hasta el momento, recibida o requerida, puede utilizarse para reducir la sección del circuito en la que se conoce que está contenido el fallo. A partir de este momento, es de aplicación la segunda parte del procedimiento sistemático propuesto, orientado al aislamiento del fallo y la reposición del suministro.

En una primera fase del proceso de delimitación de la sección que contiene el fallo, se amplía la utilidad de las consultas sobre el estado de alimentación de los clientes para identificar el dispositivo de protección que ha actuado despejando la falta, y por tanto delimitando el alcance de la interrupción. Para conseguir el completo aislamiento de la sección de red afectada y la reposición del suministro que sea posible, se determinan una serie de actuaciones de maniobra guiadas por unas reglas heurísticas simples. Entre las alternativas planteadas, se selecciona para su realización aquella secuencia de maniobras que consigue la mayor re-

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

ducción de un determinado índice que cuantifica el impacto de la interrupción, considerando conjuntamente la extensión de la interrupción y el tiempo estimado hasta la restitución del estado normal.

Al finalizar el procedimiento planteado, el circuito se encontrará reconfigurado como consecuencia de la realización de las maniobras propuestas, y el conocimiento sobre la ubicación del fallo se habrá incrementado hasta reducirlo a la sección de red que será necesario inspeccionar para localizar y posteriormente reparar el fallo.

Adicionalmente a su utilización como herramienta en tiempo real, los reducidos tiempos de computación obtenidos permiten plantear como futuras líneas de investigación su aplicación a técnicas de análisis de impacto de inversiones. La funcionalidad ofrecida para prever las actuaciones decididas por el operador de la red ante cada posible fallo, permite que se disponga de una valoración realista del alcance y duración de la interrupción asociada.

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

Índice

Resumen	III
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Ámbito de estudio	3
1.3 Antecedentes sobre la gestión de interrupciones y estado del arte	5
1.4 Etapas de la gestión de una interrupción	8
1.5 Objetivos	13
1.6 Estructura de la tesis	15
2 Herramientas algebraicas	17
2.1 Información estática	17
2.2 Grafo funcional de un circuito radial MT	18
2.3 Subconjuntos de nudos del grafo funcional	20
2.4 Algebra asociada al grafo funcional de un circuito	22
3 Detección de una interrupción en un circuito MT	25
3.1 Información dinámica asociada al estado interrumpido de un circuito	26
3.2 Creación de conocimiento a través de la información adquirida	29



3.2.1	Señalización de actuación de dispositivos de protección	31
3.2.2	Señalización de detectores de paso de falta	33
3.2.3	Estado de alimentación de los centros de distribución	35
3.3	Aplicación a la identificación del estado interrumpido	37
3.3.1	Módulo de análisis de la señalización	38
3.3.2	Módulo de consultas a clientes	41
3.3.3	Identificación del conjunto de nudos sospechosos	44
3.3.4	Ejemplo. Casos de alerta por señalización	44
3.3.5	Ejemplo. Casos de alerta por reclamación de clientes	46
3.4	Consideraciones para la ampliación de la metodología presentada	48
3.4.1	Fallos de los detectores de paso de falta	48
3.4.2	Fiabilidad de la capacidad de señalización de los dispositivos	49
3.4.3	Fiabilidad en la capacidad de reconexión de los dispositivos de protección	50
3.4.4	Ampliación de la metodología a otros dispositivos	50
3.5	Conclusiones	54
4	Aislamiento del fallo y reposición del suministro	57
4.1	Identificación del dispositivo de protección abierto	58
4.2	Estado FDISR. Conceptos preliminares	62
4.2.1	Caracterización del estado FDISR	63
4.2.2	Secuencia de maniobras	65
4.3	Metodología propuesta para la selección de una secuencia de maniobras	69
4.3.1	Conjunto de secuencias de maniobras candidatas	69
4.3.2	Beneficio esperado de una secuencia de maniobras	72
4.3.3	Criterio de selección de una secuencia de maniobras	74
4.4	Implementación algebraica	75
4.4.1	Inicialización	76
4.4.2	Medidas asociadas al estado $x(k)$	76
4.4.3	Validación de restricciones técnicas	78



Índice	IX
4.4.4 Detección de secuencias de maniobras candidatas	81
4.4.5 Evaluación del beneficio esperado de una secuencia de maniobras	82
4.4.6 Selección de la actuación y validación del estado alcanzado	85
4.5 Impacto total de una interrupción	85
4.6 Consideraciones para la ampliación de la metodología presentada	88
4.6.1 Circuito con bucles abiertos	88
4.6.2 Ampliación de las restricciones técnicas al análisis de existencia de congestiones	89
4.6.3 Selección de actuaciones en maniobra mediante búsqueda en profundidad	93
4.6.4 Ampliación de las reglas heurística en la metodología de búsqueda en profundidad	97
4.6.5 Consideraciones sobre la realización aplazada de actuaciones	99
4.7 Conclusiones	100
5 Conclusiones finales	103
5.1 Conclusiones	103
5.2 Publicaciones	104
5.3 Futuras líneas de investigación	105
5.3.1 Instalación de nuevos dispositivos distribuidos y mejora funcional de los dispositivos existentes	107
5.3.2 Modificaciones constructivas y reconfiguración de la red	108
5.3.3 Estrategias en la movilización de recursos y automatización	109
5.3.4 Análisis de criterios de fiabilidad en el acceso a las redes	109
Apéndice A Metodología algebraica para el procesamiento de la información	111
A.1 Matriz de sucesores de un árbol radial	111



A.2	Operaciones sobre la matriz de sucesores	116
A.2.1	Identificación de subgrafos en G determinados por un subconjunto de nudos	116
A.2.2	Grafo funcional del circuito radial reorientado	118
A.2.3	Secuencias de recorrido en profundidad de un árbol	121
Apéndice B Ejemplo de red simple		127
B.1	Descripción del circuito de ejemplo	127
B.2	Selección de ST en un sólo paso	129
B.2.1	Escenario A	129
B.2.2	Escenario B	132
B.3	Selección de ST mediante búsqueda en profundidad	135
B.3.1	Escenario A	135
B.3.2	Escenario B	138
Apéndice C Ejemplo de red real		141
C.1	Descripción del circuito de ejemplo	141
C.2	Identificación del estado interrumpido	144
C.2.1	Casos de alerta por la recepción de señalización	145
C.2.2	Casos de alerta por reclamación de clientes	147
C.3	Aislamiento del fallo y reposición del suministro	148
C.3.1	Escenario A	152
C.3.2	Escenario B	155
	<i>Notación</i>	165
	<i>Índice de Figuras</i>	171
	<i>Índice de Tablas</i>	175
	<i>Bibliografía</i>	177



1 Introducción

1.1 Motivación

La fiabilidad de las redes de distribución y la continuidad del suministro eléctrico forman parte del compromiso de la actividad de distribución eléctrica. La consecución de tiempos bajos de indisponibilidad de la alimentación asegura la satisfacción de los clientes y generalmente es recompensado con incentivos retributivos a las empresas distribuidoras. Este objetivo ha impulsado que, adicionalmente a la mejora de los procesos de operación y mantenimiento de las redes, los criterios de calidad de suministro se hayan incorporado en los procesos de decisión de inversiones de mejora y planificación de las redes eléctricas ([1]).

Cualquier interrupción del servicio al cliente originada por un fallo permanente en el sistema de distribución debe ser detectado por el operador de la red o sistema de distribución (OSD) lo antes posible. Una vez detectada la existencia de un defecto permanente en el circuito, el OSD debe iniciar una serie de tareas encaminadas a reestablecer lo antes posible el suministro a los clientes afectados, y finalmente restituir el estado normal de operación, una vez se localice y se corrijan las circunstancias del fallo.



Los métodos y procedimientos tradicionales para reducir la duración de las interrupciones accidentales del servicio a los clientes, siguen criterios principalmente basados en el conocimiento del OSD en la configuración de la red de distribución y su experiencia en la gestión de incidentes pasados. La progresiva introducción de dispositivos que permiten detectar la existencia de un defecto, y la automatización y control remoto de las actuaciones de los dispositivos, han permitido mejorar ([2]) los tiempos de reacción y actuación de los procedimientos operativos en la gestión de incidentes.

La cantidad de información recibida de dispositivos, generadores distribuidos, equipos de medida, etc., será abrumadora en el próximo paradigma de red inteligente. Además, la progresiva integración y abaratamiento de las comunicaciones con los elementos distribuidos favorecerá la capacidad de interacción con estos, permitiendo que sean consultados o reciban órdenes de actuación. El impacto de estos nuevos recursos en la consecución de menores tiempos de indisponibilidad del suministro requerirá de una mayor sofisticación en los métodos de interpretación de información y toma de decisiones de actuación. Por otro lado, la consideración de posibles modificaciones en la configuración de las redes de distribución, la variabilidad del estado de operación de la generación distribuida (GD), la existencia de clientes que exigen su reposición del suministro de forma prioritaria, entre otros factores, hacen necesaria la implementación de procedimientos sistemáticos para la gestión eficiente de las interrupciones. Esta necesidad de disponer de mayor inteligencia en la gestión de la información y los recursos se incrementa a medida que las distribuidoras van completando sus sistemas de información técnica a las redes de menor tensión y la integración en esta de generación asociada al consumo.

La integración de estos procedimientos sistemáticos, debe ser asimismo contemplada en el análisis de rentabilidad de las inversiones para la mejora de la fiabilidad, a través del impacto esperado en los incentivos retributivos.



1.2 **Ámbito de estudio**

Las consideraciones necesarias para la clasificación y tratamiento de las interrupciones de suministro, son muy distintas en el caso de clientes de alta tensión (AT) y de media y baja tensión (MT y BT), debido a las distintas topologías de la red eléctrica que los alimenta. Los clientes AT están conectados a la red de alta tensión o reparto que, por su estructura mallada y configuración redundante en los equipos de transformación en las subestaciones (criterio N-1), minimiza la propagación de incidencias al suministro en caso de fallo.

Los clientes MT se alimentan desde la red de media tensión, cuyo trazado y naturaleza constructiva la hacen mucho más sensible a sufrir indisponibilidades. Esta red, aunque tiene una estructura mallada, se opera tradicionalmente de forma radial desde la subestaciones AT/MT, lo que provoca una alta incidencia de las indisponibilidades ocurridas en la red sobre la interrupción del suministro a los clientes. Además, las incidencias ocurridas en niveles de tensión superiores a la red MT, propagan su efecto sobre ésta cuando suponen la interrupción del servicio a los transformadores que la alimentan.

Los criterios de operación, el grado de automatización y gestión del mantenimiento de las redes de AT y MT son suficientemente distintos como para que definitivamente se justifique la separación de ambas redes en el planteamiento del estudio de la continuidad de suministro. Los clientes BT son alimentados mediante redes de baja tensión que transportan la energía desde los centros de distribución (CD) con transformación, normalmente alimentados en media tensión. El suministro de los clientes BT, además de las causas que afecten a la instalación propia del cliente, se ve afectado por la indisponibilidad de la línea BT que lo alimenta o por la falta de alimentación del CD que lo suministra.

Este trabajo se centra en las redes de distribución de media tensión, que alimentan a los clientes MT y BT a través de los CD. La red de distribución es la más extensa, la que proporcionalmente más crece, la más heterogénea y cuyos elementos están implicados en la mayoría de las incidencias que tienen por resultado la interrupción del suministro a los clientes. La evolución tecnológica de los elementos de medida,



protecciones y elementos de maniobra y seccionamiento, incluyendo los que permiten la actuación remota, favorecen la optimización de criterios de eficiencia energética, robustez y mejora de la calidad de servicio, principalmente en la red de distribución.

El origen de las interrupciones en la alimentación de los clientes de BT y MT, son principalmente tres:

- La interrupción de la alimentación en las barras de media tensión de las subestaciones de reparto, de las que parten los circuitos de media tensión. Aunque en el caso de existencia de GD el sentido de la inyección de energía no es siempre en sentido radial, en la práctica, no se contemplan situaciones con clientes atendidos por los generadores mientras su alimentación en cabecera de subestación está interrumpida (operación en isla).
- La actuación de las protecciones de salida de los circuitos que parten desde un CD hacia los clientes. Estas incidencias no provocan ninguna consecuencia en la red de MT y por tanto no afectan a clientes alimentados desde otros CD.
- La actuación de un dispositivo de protección de la red de distribución que desenergiza el CD desde el que se alimentan los clientes. Cuando actúa el dispositivo de protección, normalmente instalado en la cabecera del circuito, se interrumpe el suministro de todos los CD que alimenta. En caso de que en el despeje de la falta actúe algún dispositivo de protección distribuido en el circuito, la interrupción se limita a los CD conectados aguas abajo del dispositivo.

La consideración de fallo referida en este trabajo se limita a los casos descritos en último lugar, cuando la incidencia se produce de forma accidental en elementos integrantes de la red MT. Se asume que cuando se produce un fallo en un determinado circuito MT, la afectación sobre la continuidad del suministro se limita únicamente a las cargas de este circuito.



1.3 Antecedentes sobre la gestión de interrupciones y estado del arte

Aunque un esquema de operación mallado permitiría reducir las pérdidas técnicas, la configuración de las redes de distribución en estado normal o estándar suele ser radial. La causa principal de esta configuración radial es que las protecciones existentes, muchas de ellas instaladas hace décadas, requieren un sentido único de transmisión de la energía. Además, la explotación radial simplifica los procedimientos de operación que se ponen en marcha cuando se produce una interrupción del suministro causada por una falta.

La ocurrencia de un fallo en un determinado circuito se evidencia por la aparición de la corriente de falta asociada y la consecuente actuación de alguno de los dispositivos de protección instalado en el circuito. Cuando la protección que actúa en el despeje de la falta dispone de la capacidad de reconexión automática (rearme o reenganche), el circuito puede volver a su estado normal si las circunstancias que han causado la falta desaparecen cuando se produce la reconexión. En estos casos, cuando se produce la reconexión exitosa de un dispositivo de protección ante un fallo espurio (arcos debido a humedad ambiente o caída de ramas de árboles, entre otros), no se requiere la actuación del OSD.

La interrupción del suministro tras una falta será permanente cuando permanezcan las condiciones del fallo tras los intentos de reconexión programados en el dispositivo de protección que despeja la falta o, en cualquier caso, cuando este no disponga de la funcionalidad de reconexión. Otro motivo por el que se llega al estado interrumpido es por la rotura de una línea en cuyo caso se interrumpe la continuidad eléctrica del circuito sin aparición de corriente de falta. Son estas interrupciones permanentes, que requieren de la actuación del OSD y los agentes de la red de distribución, las que implican un impacto en los índices de continuidad de suministro de las empresas distribuidoras. Por último, existen situaciones en las que las interrupciones están motivadas por la ejecución de tareas programadas, por situaciones de sobrecarga de algún elemento que provoca la actuaciones de las protecciones correspondientes, o por el deslastre de carga por parte del OSD, aunque estos últimos casos ([3]) no son tratados generalmente como fallos.



Las primeras publicaciones sobre calidad de suministro en sistemas eléctricos se centran principalmente en los sistemas de generación. En [4] y [5] se introducen y desarrollan las primeras descripciones analíticas y métodos de cálculo probabilístico para evaluar tasas de fallo y tiempos de duración de interrupciones en redes de distribución. Los trabajos que desarrollan métodos de análisis de resultados históricos y distribución de incidencias ponen de manifiesto la necesidad de establecer patrones de distribución de índices de fallo y tiempos de duración de interrupciones. Estos patrones servirán para establecer de forma eficiente las medidas correctivas destinadas a la mejora de la calidad de suministro. En [3] se pone de relieve la necesidad de identificar los eventos de mayor impacto en la calidad ofrecida por una distribuidora, pudiendo discernir los extraordinarios, ambientales o accidentales, de los que dependen directamente de la actividad de operación de la red. Similares conclusiones se presentan en [6], donde a partir de datos históricos de distribuidoras de EEUU, se remarca la necesidad de separar los efectos anormales del cálculo de los índices de calidad, para centrar los esfuerzos para la mejora de la continuidad de suministro en consideraciones técnicas.

En [7] se presentan algunas técnicas de análisis estadístico para el tratamiento de los datos históricos destinados a determinar los días de año en que se producen las principales incidencias (major event days, MEDs). Una de ellas, basada en una distribución normal logarítmica de probabilidades de SAIDI diario llamada ‘Three Beta Method’, es la más extendida en otras publicaciones. En [8] se analizan valores históricos de tasas de fallo para determinar el efecto del envejecimiento de los elementos de la red, principalmente en dispositivos de seccionamiento y líneas aéreas.

Analizando conjuntamente valores históricos de calidad de suministro y la distribución georreferenciada de los eventos y los valores de demanda punta, en [9] se concluye que para ampliar el conocimiento sobre tasas de fallo se requiere utilizar procesos analíticos sobre un modelo topológico real de la red. En [2] se concluye que un aumento en la inversión de automatización, monitorización y control de la red, consigue una mayor reducción de los índices de continuidad que la obtenida con el desarrollo de técnicas clásicas para evitar fallos (pararrayos, instalaciones blindadas, etc.). Los autores de [1] presentan una propuesta de clasificación de los factores que afectan a las interrupciones, en factores intrínsecos (producto de las



características demográficas y geográficas de la zona donde se encuentra la red de distribución) y en factores históricos (derivados del diseño y configuración de la red).

En [10, 11] se introducen las distintas fases y eventos considerados en la evolución de una interrupción, desde la aparición de la falta hasta la restitución del estado normal, que son de aplicación en los métodos analíticos de transición de estados, con el objetivo de determinar los índices de continuidad esperados a partir de tasas de fallo ([12, 13]) y tiempos característicos de duración de tareas ([14, 15]). En estos métodos, un sistema de distribución eléctrico puede describirse como un proceso continuo de Markov en el que la transición entre dos estados de funcionamiento de la red; el estado disponible y el estado indisponible, está determinada por unas tasas independientes del tiempo en que el sistema permanece en cada estado. En [16] se presenta una implementación computacional basada en esta metodología, conjuntamente con técnicas de simulación de Monte Carlo, y en [17] se analiza el problema de la continuidad del suministro considerando estados de reposición, combinando técnicas markovianas y la teoría de cortes mínimos.

La fiabilidad de los dispositivos de protección y maniobra de la red y los estados de reposición intermedios son considerados en [18] mediante procedimientos más sofisticados basados en procesos de Markov jerárquicos (HMN). La publicación [19] representa un ejemplo de los esfuerzos por encontrar planteamientos más simples, idealizando el comportamiento de los elementos de protección y maniobra, y discretizando el número de estados posibles en la transición desde el fallo a la restitución del estado normal.

Las técnicas de simulación de fallos y evaluación de efectos (Failure Modes and Effects Analysis - FMEA) aplicadas al análisis de la fiabilidad de sistemas eléctricos, consisten en evaluar el efecto que cada posible fallo tiene sobre la continuidad del suministro. Ante cada fallo, caracterizado por su tasa probabilística, se determina la evolución del sistema en estados intermedios de reposición del suministro afectado, hasta la localización y reparación de la avería. En [20] se exponen el desarrollo y los resultados obtenidos de una herramienta informática orientada al cálculo de índices de fiabilidad reglamentarios españoles, NIEPI y TIEPI, haciendo uso de técnicas FMEA e inspección de grafos. En [21] se propone



la metodología de integración de técnicas FMEA de valoración de la continuidad de suministro en las actividades de inversión y mantenimiento de una distribuidora. Los autores de [22] presentan las principales características de una herramienta destinada a generar automáticamente una red de distribución teórica, en la que la continuidad de suministro prevista forma parte de los criterios de diseño. Los métodos de enumeración de estados son aplicados en [23] para determinar la frecuencia y duración esperada de las interrupciones en redes radiales, y en [24] estas técnicas se combinan con la inspección topológica de grafos para escoger soluciones constructivas que consigan mejorar los índices SAIDI y SAIFI. En [25] se exponen las ventajas sobre la continuidad de suministro asociadas a la utilización de generación fotovoltaica embebida en la red de distribución para la reposición de cargas.

1.4 Etapas de la gestión de una interrupción

Las principales etapas consideradas en la evolución de la gestión de una interrupción son recogidas, entre otros autores, en [26, 27]:

- Detección de la aparición de un fallo e identificación del estado interrumpido del circuito.
- Aislamiento de la sección de red afectada por el fallo.
- Reposición del suministro a clientes en secciones de red aisladas del fallo.
- Localización y reparación del fallo.
- Restitución del estado normal de operación del circuito.

Las tres primeras etapas son referidas en la literatura con la sigla FDISR (Fault detection, isolation and service restoration).



La primera etapa comprende el tiempo de reacción que transcurre desde el momento en el que ocurre un fallo permanente hasta que el OSD tiene constancia de esta circunstancia y puede determinar la extensión de la interrupción del suministro. La detección de una interrupción del suministro es inmediata cuando actúa la protección de cabecera del circuito afectado cuyo estado se supervisa continuamente por el OSD, o se interrumpe el suministro de la propia subestación. Sin embargo, en caso de que una falta sea despejada sin generar señalización ([28]), el OSD no tendrá conocimiento inmediato de la existencia de la interrupción asociada. Esta circunstancia podrá llegar a ser conocida por el OSD cuando los servicios de atención comercial reciban reclamaciones de interrupción de los clientes afectados, y esta información sea procesada por los sistemas de gestión que la relaciona con las bases de datos técnicas de la distribuidora.

Cuando en el circuito en que se da el fallo, existen dispositivos de protección con capacidad de reconexión automática puede existir incertidumbre sobre el estado de continuidad de suministro del circuito, dependiendo del éxito conseguido en los intentos programados de reconexión. Es por tanto crucial en esta etapa, como en la siguientes, disponer de una correcta información sobre la topología y conectividad del circuito ([9]) y la funcionalidad operativa de los dispositivos instalados, para procesar conjuntamente ([29]) el flujo de alarmas, señales de disparo, llamadas de clientes y otras evidencias recibidas en tiempo real.

Cuando se ha confirmado la permanencia de la interrupción, el OSD inicia la coordinación de actuaciones de maniobra ([30]) dirigidas al aislamiento de la sección del circuito que contiene el fallo.

El OSD pondrá inicialmente en marcha una serie de actuaciones destinada a delimitar cuanto sea posible la sección de red que contiene el fallo. Para esto se modifica temporalmente la configuración del circuito afectado para desconectar una determinada sección del circuito de la otra sección que queda conectada a la cabecera. Esta reconfiguración se consigue modificando el estado de dispositivos de seccionamiento con el interruptor de cabecera del circuito abierto. Al restituir la alimentación, se concluirá que el elemento que ha fallado está contenido en la sección energizada en caso de que vuelva a aparecer la falta, o en la sección deslastrada en caso contrario. Esta operación será telecontrolada en caso de que



los dispositivos de maniobra dispongan de esta funcionalidad; en caso contrario se requerirá el desplazamiento y acción manual de operarios coordinado desde el centro de operación.

Este procedimiento, podría repetirse hasta que la sección que contiene el fallo quede reducida tanto como permitan los dispositivos de seccionamiento existentes. Sin embargo, en la práctica esta práctica puede quedar limitada a un par de operaciones sobre los llamados elementos de primera y segunda maniobra, que son determinados dispositivos estratégicamente ubicados y generalmente telecontrolados o de rápido y fácil acceso por parte de las brigadas. La principal razón de esta limitación es poder disponer de protocolos de actuación sencillos y semiautomáticos y reducir el desgaste de los elementos de protección.

Aunque las actuaciones que conducen al aislamiento del fallo, suponen la interrupción temporal del suministro de toda la salida, incluso de las cargas no afectadas inicialmente por el fallo, los tiempos de actuación son pequeños. Por esto, con carácter general, se considera un mal menor el perjuicio ocasionado a estos clientes frente a la oportunidad de reducir los tiempos de indisponibilidad conseguidos.

Una vez que la sección que contiene el fallo quede delimitada, puede considerarse la reposición del suministro en las secciones sanas, cuando sea posible, si previamente se aíslan de la sección comprometida. Desde el momento en que se tiene constancia de un fallo en un circuito hasta la finalización de las maniobras que consiguen reducir la sección de circuito que la contiene y su aislamiento, transcurre un tiempo que se define como tiempo de aislamiento.

Por tanto, el suministro de un cliente que hubiese sido afectado por la aparición de la falta, podría ser repuesto si la sección de red en la que se encuentra el CD desde el que se alimentan permanece aislado de la sección comprometida por el fallo. Así, todos los CD que se encuentren aislados aguas arriba de la sección afectada pueden permanecer alimentados desde la cabecera del circuito. Los CD que queden aislados aguas abajo del elemento que ha provocado la falta, y por tanto sin conexión con la cabecera, solo podrán quedar alimentados desde circuitos adyacentes de respaldo, sanos y con suficiente capacidad disponible



[31] o, si surge la oportunidad, recurriendo a la GD integrada ([32, 25, 33]). Las reconfiguraciones que posibilitan la transferencia de cargas a circuitos adyacentes, para poder permanecer alimentadas hasta que se finalice la reparación del fallo, requieren el cumplimiento de las restricciones técnicas exigidas ([34, 35]). Estas restricciones suelen observar criterios de configuración (radialidad), capacidad de línea y tensión de suministro. Cuando se considera la GD como fuente alternativa de respaldo se introducen restricciones adicionales relacionadas con la característica dinámica de estos grupos y procedimientos operativos para operar en isla ([36]). El manejo de las restricciones se hace más complejo con la incertidumbre sobre la demanda prevista por los suministros y el arranque de la carga en frío ([37]).

Una vez se haya concluido el aislamiento de la sección de red que contiene el fallo, se necesita determinar exactamente qué elemento ha provocado la falta y, en caso de líneas, la ubicación exacta del defecto. El tiempo destinado a estas tareas de búsqueda del fallo mediante la revisión visual del trazado de la red o utilización de herramientas de detección, se define como tiempo de localización. En algunos casos el defecto podrá corregirse rápidamente (caso de objetos en contacto con la red, inundaciones de centros de distribución, etc.), pero en otros casos la reparación puede requerir de varias horas o incluso días. En cualquier caso, el OSD deberá garantizar que la tarea de reparación se realiza de acuerdo a los criterios de aislamiento, señalización y securización que exigen las normas de operación. La duración de las tareas realizadas desde la localización del fallo hasta su reparación, se define como tiempo de reparación.

El proceso de toma de decisiones que debe seguir el OSD para reponer el suministro es muy complejo. Bajo un criterio más conservador puede decidirse aplazar la reposición de las cargas hasta que el OSD tenga suficiente información para aislar completamente la sección que contiene el fallo, o incluso hasta identificar el origen del fallo a costa de incrementar el tiempo de indisponibilidad de los suministros que pudieran ser repuestos. En otros casos podrá considerarse que a medida que se vayan identificando secciones sanas del circuito, se ejecuten las maniobras necesarias para ir reponiendo el suministro. En esta toma de decisiones sobre la secuencia de actuaciones encaminadas al aislamiento y reposición se considerará el impacto sobre los tiempos de indisponibilidad teniendo en cuenta los recursos disponibles.



En función de cómo se priorizan las actuaciones, puede distinguirse dos tipos de estrategias en la gestión del aislamiento del fallo y reposición del suministro:

- La estrategia denominada FDISR en dos etapas ([38]): prioriza la delimitación y aislamiento de la sección de red afectada en una primera etapa y posteriormente consideran realizar las reconfiguraciones de red necesarias para reponer el suministro que sea posible desde la cabecera del circuito o desde circuitos adyacentes con capacidad suficiente.
- La estrategia FDISR integral o de única etapa: considera conjuntamente las actuaciones de maniobra que sirvan para avanzar en la delimitación de la sección de red afectada y las que conducen al aislamiento y reposición del suministro. Esta estrategia, a expensas de requerir de una toma de decisiones más compleja, consigue reducir la duración de la interrupción en los suministros.

Las metodologías de decisión de actuaciones pueden considerar varios criterios como la reposición del máximo número de clientes, minimizar la energía no servida, minimizar el número de maniobras ([39]), etc. En cualquier caso se exige el cumplimiento de las restricciones técnicas en las reconfiguraciones realizadas. Ante este problema complejo en [40, 41] se presentan propuestas metodológicas heurísticas, en las que se aplican reglas simples basadas en la experiencia para acotar las alternativas operacionales valoradas ([42, 43]). Otras propuestas, como en [44, 45], consideran la valoración de alternativas combinatoriales que ofrecen soluciones más eficientes a costa de manejar mucha más información y modelos más complejos. Pueden encontrarse estas estrategias en desarrollos basados en programación lineal ([27, 38]), teorías de grafos ([46, 47]), lógica borrosa ([48, 49]), algoritmos genéticos ([50]), redes neuronales ([51, 52]) y programación matemática ([53]).

Finalmente pueden destacarse las estrategias expertas (expert systems) en las que se emplean reglas de decisión previstas (knowledge-based) para tomar decisiones muy rápidas principalmente orientadas a la actuación remota. Esta solución persigue la reposición casi inmediata de suministros ([54]) que puede coordinarse de forma centralizada ([27]) por el OSD o implementarse mediante la coordinación



de elementos distribuidos en las redes (multi-agentes) ([26]).

Tras la reparación del fallo, todos los dispositivos de seccionamiento cuyo estado ha sido modificado en las distintas etapas de gestión de la incidencia en un circuito, deberán volver a ser maniobrados para reestablecer el estado normal de operación.

1.5 Objetivos

Este trabajo presenta una metodología que puede servir como herramienta en tiempo real al OSD en la gestión de incidencias en redes radiales de media tensión, con el objetivo de reducir los tiempos de indisponibilidad del suministro. El alcance de su aplicación de esta metodología a redes reales comprende las etapas FDISR:

- Detección de la aparición de un fallo e identificación del estado interrumpido del circuito.
- Aislamiento de la sección de red afectada por el fallo.
- Reposición del suministro a clientes en secciones de red aisladas del fallo.

La exposición del procedimiento metodológico presentado, que puede ser abordado con técnicas clásicas como es el caso de la inspección topológica ([24, 55]), se acompaña de un planteamiento algebraico novedoso basado en un determinado modelo topológico del circuito en el que se organizan los elementos que forman el circuito y su relación jerárquica en la configuración radial de operación. Esta metodología desarrollada asume el desempeño de los procedimientos de operación tradicionales y aprovecha toda la información que la automatización, monitorización ([33]) y control de la red ([2]) ofrecen para generar conocimiento útil en la gestión de interrupciones.

El procedimiento sistemático presentado comienza cuando el OSD recibe la alerta de la aparición de una falta. Estas alertas pueden recibirse desde la señalización disponible en dispositivos instalados en el circuito (protecciones o detectores de



paso de falta) o bien, en ausencia de señalización, desde los clientes alimentados cuando reclamen su interrupción. La interpretación de la información propuesta permitirá concluir si existe interrupción de algún suministro en el circuito que genera la alerta, o por lo contrario, el estado es normal por reconexión exitosa de un dispositivo de protección.

Se integra un criterio de selección de los suministros para los cuales conocer su estado de alimentación representa información útil para crear mayor conocimiento sobre el estado del circuito y en su caso, el alcance de la interrupción y ubicación del fallo. Se asume que el OSD puede obtener esta información consultando directamente a los clientes o a los equipos de medida telegestionados.

Cuando el OSD concluya la existencia de un fallo permanente, el procedimiento sistemático continuará, sirviendo para proponer al OSD las secuencias de actuaciones de maniobra ([42, 43]) a realizar para avanzar conjuntamente en la delimitación y aislamiento de la sección de red afectada y a la reposición del suministro. Para evitar procedimientos combinatoriales ([44, 45]) y conseguir requerimientos computacionales reducidos, se propondrán reglas simples ([40, 41]) en el planteamiento de las alternativas consideradas y en el criterio para su selección. La formulación algebraica servirá en esta fase del procedimiento para evaluar el cumplimiento de las restricciones técnicas ([34, 35]) y obtener una cuantificación del impacto esperado de cada alternativa considerando la reposición conseguida y los tiempos previstos de las tareas consecuentes de localización y reparación del fallo.

El procedimiento finaliza con el circuito reconfigurado como consecuencia de las maniobras realizadas y toda la información disponible en ese momento habrá servido para reducir la sección de la red que será necesario inspeccionar en la siguiente etapa para localizar el fallo.

Se emplea parametrización de las tasas de fallo ([12, 9, 3]) de los elementos constructivos de las redes y la duración características de actividades implicadas ([14, 15]) en las etapas de gestión de la incidencia. Estos datos son empleados dentro de la metodología como una referencia en la toma de decisiones, por lo que su adecuada representatividad estadística ([7]) permitirá obtener mejores resultados en la reducción de tiempos de indisponibilidad.



El contenido expuesto se ha presentado en las publicaciones [56] y [57]. En este documento, se amplían los contenidos de ambas publicaciones y se homogeniza la nomenclatura con el propósito de conseguir un mejor entendimiento sin la restricciones propias del formato original.

1.6 Estructura de la tesis

El capítulo 2 introduce los conceptos y herramientas algebraicas que servirán para desarrollar la metodología expuesta y el planteamiento matemático que le acompaña. Las definiciones y propiedades de las estructuras algebraicas referidas en el desarrollo metodológico se exponen con mayor detalle y se acompañan de ejemplos en el apéndice A.

En el capítulo 3 se expone el primer procedimiento sistemático que, partiendo de la recepción de la alerta de una falta, sirve para la identificación de la existencia de una interrupción permanente en un circuito. Inicialmente se definen las expresiones matemáticas que relacionan la ocurrencia de fallos con la interrupción del suministro considerando la actuación de los dispositivos de protección instalados y la señalización consecuente. Análogamente, se determinan las expresiones que permiten generar conocimiento sobre la posible ubicación de un fallo a partir de la señalización recibida desde los dispositivos de protección, detectores de paso de falta y evidencias de interrupción recibidas de clientes. El procedimiento se completa con la consideración de la señalización recibida tras los posibles intentos de reconexión y la definición de un criterio de selección de clientes sobre los que es posible recabar información útil. Para ayudar en su comprensión, la descripción metodológica se acompaña en este capítulo de un ejemplo tutorial, y en el primer apartado del apéndice C en un ejemplo de red real.

La segunda parte del procedimiento sistemático propuesto, orientado al aislamiento del fallo y la reposición del suministro, se describe en el capítulo 4. Este procedimiento comienza desarrollando la ampliación del uso de las consultas sobre el estado de alimentación de los clientes a una primera fase de aislamiento del fallo. Se introduce el concepto de estado FDISR, con el que se plantea una estrategia



integral para el avance en la delimitación y aislamiento de la sección de red afectada y la reposición del suministro en secciones aisladas del fallo. Se definen las medidas asociadas a estos estados, que posibilitan evaluar el impacto esperado de la interrupción, y facilitan la descripción de las reglas heurísticas que determinan las actuaciones de maniobra consideradas y el procedimiento propuesto para su selección. Para ilustrar la metodología propuesta en este capítulo, en el apéndice B se expone su aplicación sobre un ejemplo de red simple, y en el apéndice C sobre un ejemplo de red real.

Finalmente el último capítulo contiene las principales conclusiones de la tesis y las futuras líneas de investigación que derivan de los métodos y procedimientos expuestos.

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



2 Herramientas algebraicas

En este capítulo se introducen los conceptos y herramientas algebraicas que servirán para desarrollar la metodología expuesta y el planteamiento matemático que le acompaña. Se presenta el grafo funcional de un circuito eléctrico radial, sobre el que se definen las estructuras matemáticas que almacenarán los elementos que forman el circuito, su relación jerárquica en la configuración radial de operación y la parametrización.

Las definiciones y propiedades de las estructuras algebraicas referidas en el desarrollo metodológico se desarrollarán con mayor detalle, acompañadas de ejemplos, en el apéndice A.

2.1 Información estática

A pesar de que los sistemas de distribución de media tensión están mallados estructuralmente, estos se operan en una configuración radial. Esta configuración de operación suele ser estable, aunque puede modificarse cuando se prevén grandes variaciones de la demanda, y ocasionalmente, durante tareas de mantenimiento o reparación, en las que se modifica la configuración predeterminada, devolviéndose al estado inicial o estándar en cuanto es posible.



En este trabajo, consideraremos que en el instante anterior a la ocurrencia de un fallo en un circuito MT radial, el OSD dispone de la siguiente información estática de este circuito:

- Conectividad eléctrica de todos los elementos que componen el circuito, desde su cabecera en barras de la subestación primaria a través de las secciones del circuito ([58]).
- Ubicación de los centros de distribución (CD) y la generación distribuida (GD) integrada ([59, 60]), cuyo estado operativo es conocido.
- La ubicación, funcionalidad y estado de cada dispositivo de protección (DP), detector de paso de falla (DPF) y dispositivos de seccionamiento (DS).
- Tasa de fallos (valor esperado) para cada componente de la red, obtenida de registros históricos ([13, 6]).
- Conjunto de los clientes de baja y media tensión alimentados desde cada CD ([9]).

2.2 Grafo funcional de un circuito radial MT

El planteamiento matemático propuesto se basa en la definición de un grafo, denominado grafo funcional, que modela un circuito eléctrico radial y que puede ser fácilmente generado desde las bases de datos estructuradas que manejan los sistemas técnicos de las distribuidoras.

Este grafo funcional permite homogeneizar las estructuras en las que se organizan los elementos que forman el circuito y su relación jerárquica en la configuración radial de operación. Así, se consigue una formulación algebraica compacta que siendo implementada con estrategias de matrices dispersas, no incrementa significativamente la cantidad de información ni requiere en su aplicación un esfuerzo computacional mayor respecto a emplear otro tipo de grafo. No obstante, los pro-



cedimientos presentados son igualmente válidos sobre cualquier modelo de grafo eléctrico que se escoja para contener la relación topológica de sus elementos.

El grafo funcional correspondiente a un circuito eléctrico radial, es un árbol con raíz, $\mathbf{G} = \{\mathcal{N}, \mathcal{E}\}$, donde cada nudo en el conjunto \mathcal{N} , de tamaño n , tiene una relación biunívoca con un elemento del circuito eléctrico: tramos de línea, DP, DPF, CD, DS, GD, etc. Dada esta relación, un nudo del grafo funcional (en adelante, nudo) modela o representa al correspondiente elemento del circuito. Siendo el nudo raíz el correspondiente al elemento desde el que se energiza el circuito, el conjunto de enlaces \mathcal{E} están orientados desde esta raíz de forma que $(i, j) \in \mathcal{E}$ cuando el elemento correspondiente al nudo i es el predecesor inmediato del correspondiente a j , en el sentido de alimentación radial del circuito.

En la figura 2.1 se muestra el diagrama unifilar de un circuito simple de ejemplo, donde se ha etiquetado cada elemento de red del número 1 al 25. La Figura 2.2 muestra el grafo funcional ($n = 25$) asociado al circuito, en el que cada nudo está numerado de forma coincidente con la etiqueta mostrada en 2.1.

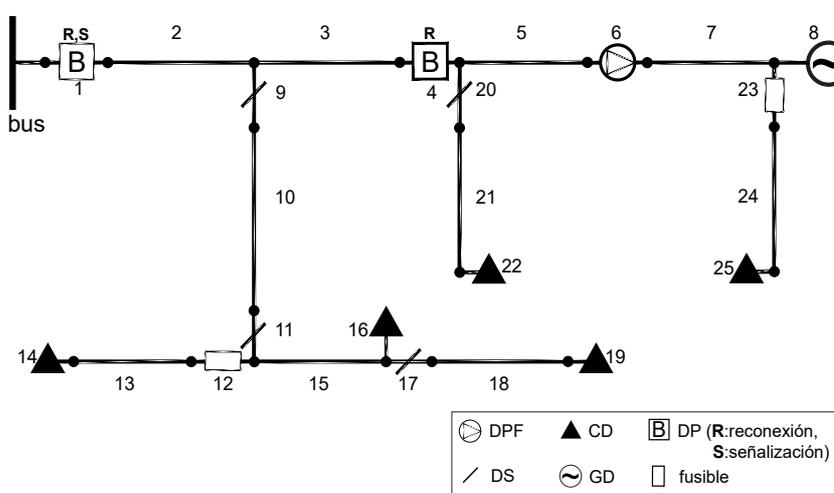


Figura 2.1 Representación unifilar del circuito de ejemplo.

Aunque en este trabajo se plantea por simplicidad la relación biunívoca entre elementos del circuito eléctrico y los nudos del grafo funcional, es posible plantear que cada nudo se corresponda con varios elementos en serie, por ejemplo, una



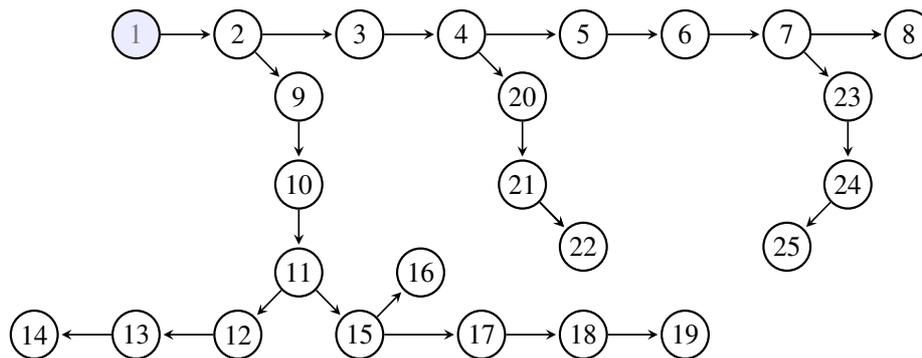


Figura 2.2 Grafo funcional de 25 nudos del circuito de ejemplo.

sucesión de tramos y centros de distribución. Por otro lado, un mismo elemento puede representarse en el grafo como una sucesión de nudos cuando convenga, por ejemplo, para modelar las funcionalidades de un elemento interruptor-seccionador con la prelación conveniente.

2.3 Subconjuntos de nudos del grafo funcional

La introducción del grafo funcional, en el que todos los elementos de red están relacionados con nudos, permite tratar de forma homogénea las distintas características estructurales y funcionales de los elementos, mediante subconjuntos de \mathcal{N} . En el ámbito de la descripción metodológica que se desarrollará en los capítulos posteriores, atendiendo al tipo de elemento, se definen los siguientes subconjuntos:

- \mathcal{P} , nudos que representan a dispositivos de protección (DP).
- \mathcal{D} , nudos que representan a detectores de paso de falta (DPF).
- \mathcal{G} , nudos que representan a la generación distribuida (GD).
- \mathcal{L} , nudos que representan a centros de distribución (CD).
- \mathcal{W} , nudos que representan a dispositivos de seccionamiento (DS).



- \mathcal{Z} , nudos que representan a tramos de línea eléctrica.

Y atendiendo a la capacidad funcional o característica estructural, se definen:

- $\mathcal{P}_s \in \mathcal{P}$, nudos DP con capacidad de señalización.
- $\mathcal{P}_r \in \mathcal{P}$, nudos DP con capacidad de reconexión.
- $\mathcal{D}_o \in \mathcal{D}$, nudos DPF con capacidad de señalización de falta direccional.
- $\mathcal{Y} \in \mathcal{W}$, nudos que representan a DS frontera con otros circuitos adyacentes (tie switches).

En la figura 2.2, los nudos $\{2,3,5,7,10,13,15,18,21,24\}$ corresponden a las secciones de línea, $\{1,4\}$ corresponden a reconectores (DP con capacidad de reconexión), $\{6\}$ es un DPF, $\{12,23\}$ son fusibles (DP sin capacidad de señalización ni de reconexión), $\{9,11,17,20\}$ son DS, $\{14,16,19,22,25\}$ son CD con clientes pasivos conectados, y finalmente el nudo $\{8\}$ corresponde a una GD directamente conectada a la red MT. Las subestaciones de distribución generalmente están equipadas con un interruptor automático en la cabecera de cada circuito, con funcionalidad de señalización y reconexión, lo que implica que el nudo correspondiente a este dispositivo (1 en el ejemplo) estará en ambos conjuntos: \mathcal{P}_s y \mathcal{P}_r . En la Tabla 2.1 se relacionan estos subconjuntos de \mathcal{N} y los nudos que contienen para el circuito simple de ejemplo presentado en la Figura 2.1.

Tabla 2.1 Subconjuntos de \mathcal{N} en el circuito de ejemplo.

Subconjunto	Nudo
\mathcal{L}	14,16,19,22,25
\mathcal{G}	8
\mathcal{P}	1,4,12,23
$\mathcal{P}_s \subseteq \mathcal{P}$	1
$\mathcal{P}_r \subseteq \mathcal{P}$	1,4
\mathcal{D}	6
$\mathcal{D}_o \subseteq \mathcal{D}$	6
\mathcal{W}	9,11,17,20



2.4 Algebra asociada al grafo funcional de un circuito

La metodología matemática que acompaña al desarrollo del procedimiento descrito en este trabajo, se apoya en la matriz de sucesores S . Esta es una matriz binaria de orden $n \times n$ que contiene la información de la jerarquía topológica de cada nudo en el grafo funcional \mathbf{G} , de forma que $S_{ij} = 1$ cuando el nudo j pertenece al subárbol de \mathbf{G} con raíz en i , es decir, j es un sucesor o descendiente de i . De forma genérica, diremos que en este caso j está aguas abajo de i y que i está aguas arriba de j .

En el apéndice ?? se describe cómo se obtiene esta matriz de sucesores a partir de la matriz de incidencias y a partir de la matriz de adyacencia de \mathbf{G} .

En la Figura 2.3 se muestra la matriz de sucesores del grafo funcional de la Figura 2.2, correspondiente al circuito simple de ejemplo.

En el apéndice A.1 se desarrollan las características más relevantes de la matriz S , en su aplicación al planteamiento matemático presentado: la fila i -ésima codifica el subárbol de \mathbf{G} con raíz en i , y la columna j -ésima codifica el camino troncal desde cada nudo a la raíz del grafo. Esta característica permite obtener expresiones compactas de utilidad en el desarrollo presentado, relacionadas con la continuidad de suministro en cada nudo, así como determinar a partir de S la altura y profundidad de un nudo, y reconstruir la matriz de adyacencia.

En el comienzo del apéndice A.2, se introduce el uso de un vector columna binario X de tamaño $n \times 1$, que codifica los nudos contenido en cualquier subconjunto $\mathcal{X} \subseteq \mathcal{N}$. Nótese que el conjunto está representado con fuente caligráfica mientras que su vector correspondiente lo está en fuente latina. Esta dualidad, conjunto-vector, se mantendrá en todo el desarrollo metodológico para mejor comprensión en la exposición de la formulación matemática.

La combinación de la matriz S y los vectores que codifican subconjuntos de nudos, permite identificar ciertos subgrafos en \mathbf{G} , condicionados a subconjuntos de \mathcal{N} . Como se expone en el apéndice A.2.1, la base de esta aplicación es la extracción



- $length$, vector de longitud de cada tramo de línea en \mathcal{Z} .

La integración de la matriz de sucesores y los vectores definidos, es utilizada en la definición de expresiones algebraicas que permiten cuantificar características del circuito, como por ejemplo:

- $[(S(\mathcal{Z}, \mathcal{L}))^t \cdot length]_i$ es la longitud de línea del camino troncal del CD i , es decir, desde la cabecera del circuito al CD.
- $[S(\mathcal{W}, \mathcal{L}) \cdot cust]_i$ es el número de clientes aguas abajo del DS i
- $[S(\mathcal{P}, \mathcal{L}) \cdot demand]_i$ es la potencia demandada de los clientes aguas abajo de DP i y que por tanto queda interrumpida por su actuación.

La formulación matemática, que acompaña a la descripción metodológica presentada en este trabajo, se consigue, casi exclusivamente, con expresiones algebraicas que únicamente contienen a la matriz de sucesores del grafo funcional del circuito y los vectores definidos. En dos excepciones se introducen nuevos factores:

- La matriz de sucesores del grafo funcional correspondiente a un circuito radial cuando se reorienta desde un determinado elemento. Esta expresión será de interés en el análisis de las reconfiguraciones del circuito para queden alimentadas desde circuitos vecinos con los que mantenga conectividad. En el apéndice A.2.2 se presenta como obtener esta matriz de sucesores a partir de la matriz de sucesores del grafo funcional del circuito original en estado normal alimentado desde su cabecera en barras de subestación, y el nudo desde el que se reorienta.

- La matriz de sucesores de un grafo radial, que modela el orden en que los elementos de un circuito son inspeccionados en la localización de un fallo. En el apéndice A.2.3 se desarrolla un procedimiento para determinar la matriz de sucesores de este grafo a partir de la matriz de sucesores del grafo funcional del circuito y un criterio definido para el recorrido.



3 Detección de una interrupción en un circuito MT

En este capítulo se describe la primera parte del procedimiento sistemático propuesto, orientado a la detección de la interrupción permanente del suministro de un circuito MT radial ante la recepción de alertas, por señalización y reclamación de clientes.

En el primer apartado se establecen los criterios funcionales considerados para los DP y DPF ante la aparición de una falta. Se introducen consideraciones sobre su comportamiento, fiabilidad y coordinación, así como ciertas restricciones operacionales que permiten plantear una exposición más amplia del procedimiento presentado.

En el segundo apartado, a partir del planteamiento matemático propuesto sobre el grafo funcional de un circuito, se definen las expresiones que relacionan el fallo de cada elemento del circuito con la señalización de la falta por los DP y DPF y la interrupción del suministro que provoca. A partir de estas expresiones se presenta el procedimiento que permiten generar conocimiento sobre la posible ubicación de un fallo a partir de la señalización recibida desde los dispositivos y desde las evidencias de interrupción de clientes recibidas.



Las expresiones matemáticas definidas son utilizadas en el procedimiento propuesto en el tercer apartado para identificar si el estado de circuito es normal y por tanto todos los suministros mantienen su alimentación, o por si al contrario el circuito está en estado interrumpido por la actuación de un DP. El procedimiento se inicia con la recepción de la alerta de una falta, y concluye con la identificación del estado del circuito empleando el conocimiento creado a partir de la señalización recibida y las reclamaciones de ausencia de alimentación de clientes.

En el cuarto apartado se exponen una serie de variaciones sobre la metodología para modelar el comportamiento de otros dispositivos de protección y señalización utilizadas en las redes de distribución reales y las consideraciones requeridas en caso de incumplimiento de las simplificaciones propuestas inicialmente.

El circuito de ejemplo presentado en el apartado 2.2 servirá para ilustrar el procedimiento a medida que se describe en este capítulo, y en el apéndice C se aplica sobre un ejemplo de red real.

3.1 Información dinámica asociada al estado interrumpido de un circuito

Los dispositivos de protección mantienen la continuidad del circuito eléctrico en estado normal y actúan interrumpiendo el suministro aguas abajo de su ubicación cuando detectan el tránsito de la corriente de falta. Cuando en un mismo circuito hay instalados varios de estos dispositivos debe preverse su coordinación ([61]) para que solo actúe el DP que logre despejar la falta deslastrando la menor sección del circuito. La selección de los dispositivos, su ubicación en un circuito y su configuración funcional atiende al estado de operación normal de los circuitos MT radiales.

Cuando un DP dispone de capacidad de señalización ([62]), el OSD tendrá constancia inmediata de su actuación y por tanto de la ocurrencia de una falta. Otra capacidad relevante en un DP es la de reconexión automática ([63]) por la cual, transcurrido un determinado tiempo tras su apertura para despejar la



falta, el dispositivo vuelve a cerrarse automáticamente para evitar la interrupción permanente del suministro en caso de fallo espurio. El número de intentos de reconexión y el retardo entre estos son parametrizables y consistentes con la estrategia de coordinación prevista entre las protecciones instaladas. Un DP que quede permanentemente abierto tras su actuación, deberá ser rearmado remota o manualmente bajo decisión del OSD para reponer la continuidad del circuito.

En la descripción metodológica que se desarrolla a continuación, se asumirán los siguientes criterios relacionados con los DP:

- En todo circuito MT radial existe, en su cabecera de alimentación, un DP con capacidad de señalización y reconexión que al actuar provoca la interrupción de todas las cargas del circuito.
- Todos los DP instalados en un circuito están debidamente coordinados para que la falta sea despejada únicamente por el DP ubicado inmediatamente aguas arriba, en el sentido radial normal de operación, del elemento que provoca el fallo.
- En cada reconexión fallida de un DP con capacidad de señalización y reconexión, ante la persistencia de las condiciones de la falta, el OSD recibe señalización de este DP.

Además de los dispositivos de protección, con capacidad para detectar y despejar corrientes de falta, también se considerarán otros dispositivos más simples que detectan y señalizan el paso por su ubicación de una corriente de falta antes de que sean despejadas por la desenergización del elemento que ha fallado. Estos dispositivos detectores de paso de falta, además de alertar con su señalización sobre la existencia de un fallo, pueden ofrecer información útil para determinar la ubicación relativa del elemento que ha fallado ([64]) respecto al DPF.

Al objeto de que la metodología descrita considere la posible variabilidad de la señalización tras los intentos de reconexión se establecen los siguientes criterios funcionales relacionados con los DPF:



- En cualquier caso, un DPF detectará y señalará siempre las faltas causadas por el fallo de cualquier elemento del circuito ubicado aguas abajo de su ubicación.
- Cuando exista una GD operativa conectada en la sección de red aguas abajo del DPF, este detectará la corriente de falta aportada desde la GD al fallo de un elemento ubicado en la sección complementaria.
- Una GD no se encuentra operativa cuando está desconectada o su contribución a la corriente de falta es insuficiente para ser detectada por cualquier DPF (por ejemplo, en caso de baja irradiancia solar para la generación fotovoltaica).
- Cuando tras la actuación de un DP se interrumpe la alimentación de una sección del circuito desde la cabecera, todas las instalaciones de GD en esta sección se desconectan. Si este DP intenta su reconexión automática y resulta fallida, no existirá aportación a la corriente de falta desde las instalaciones GD desconectadas, por lo que la señalización en este caso de un DPF puede ser distinta de la ofrecida en la falta inicial.
- Un DPF puede detectar el paso de la corriente de falta en cualquier sentido, pero solo puede discernir y señalar el sentido de esta corriente si dispone de la capacidad de señalización direccional. Si existe una GD operativa ubicada aguas abajo de un DPF que no dispone la capacidad de señalización direccional, este dispositivo puede alertar de la ocurrencia del fallo de cualquier elemento del circuito pero su información no permitirá inferir si el fallo se ha producido aguas abajo o no del DPF.

Los DP sin capacidad de señalización, como es el caso de los fusibles, no informan al OSD de su actuación. En ausencia de otros elementos que señalicen una falta, como los DPF, la actuación de un DP sin capacidad de señalización podría provocar la interrupción del suministro sin que el OSD fuese conocedor de esta circunstancia. En esos casos, el OSD solo podrá conocer la existencia de la interrupción provocada por la falta a través de las llamadas de los clientes afectados reclamando su interrupción. Adicionalmente, la información obtenida



de otros clientes sobre su estado de alimentación podrá ser útil para verificar el estado del circuito MT que los alimenta y, como se verá más adelante, podrá servir para incrementar el conocimiento sobre la ubicación el fallo. La integración de los equipos inteligentes de medida del consumo permite que sean consultados a través de los enlaces de comunicación disponibles, para obtener información sobre el estado de alimentación de manera más rápida y fiable ([65]).

Se asume que la capacidad de señalización de un DP que actuase en el despeje de la falta y los DPF que detectan la corriente de falta se realizará fiablemente. De esta forma, cuando de un dispositivo no se reciba señalización existiendo otras evidencias de la existencia de una falta, puede descartarse que se haya producido por el fallo de cualquier elemento que sí hubiese provocado esta señalización. Esto supone, en caso de ocurrencia de una falta, tanto la recepción de señalización como la ausencia de esta, sirve para crear conocimiento sobre el estado de alimentación del circuito y la ubicación del elemento cuyo fallo ha causado la falta.

Finalmente, se asume también que ante la actuación de un determinado DP con capacidad de reconexión, los intentos de reconexión programados se realizarán fiablemente. En el apartado 3.4, una vez finalizada la exposición de la metodología propuesta, se presentan las variaciones requeridas sobre esta metodología cuando se modifican algunas de las consideraciones iniciales, principalmente sobre criterios operacionales de los dispositivos y la pérdida de la fiabilidad en la ejecución de sus capacidades.

3.2 Creación de conocimiento a través de la información adquirida

En ausencia de alguna evidencia (señales, alarmas o llamadas de clientes) se asume que un circuito se encuentra en un estado de alimentación normal, sin interrupción del servicio, en el que todos sus suministros conectados permanecen alimentados.

En el momento que el OSD recibe señalización de la existencia de una falta, ya



sea a través de un DPF o de la actuación de un DP, debe comprobar si el estado de alimentación consecuente se corresponde al estado normal o al estado interrumpido. La permanencia del estado normal, en el que todos los clientes mantienen el suministro, corresponderá a la situación en la que tras una falta debida a un fallo espurio el DP que la ha despejado ha logrado reconectar exitosamente. En caso de que el DP que haya actuado no disponga de la capacidad de reconexión automática, o teniéndola, los sucesivos intentos sean fallidos, se habrá alcanzado el estado interrumpido y por tanto quedando afectada permanentemente la alimentación de todos, o parte de, los clientes del circuito.

En el caso de que reciba alguna reclamación de clientes por la interrupción de su alimentación se debe determinar si se trata de una interrupción permanente del suministro del CD al que está conectado, de la red de baja tensión, o se limita a la instalación del reclamante. La posibilidad de que esta interrupción tenga su causa en una falta en la red de media tensión debe ser compatible con la información recibida desde la señalización, considerando incluso la ausencia de esta.

Partiendo de cada uno de estos dos casos, en este capítulo se describe la metodología propuesta para asistir al OSD en detectar la interrupción de un circuito. Cuando la información disponible sea insuficiente para identificar el estado de alimentación, normal o interrumpido, esta metodología ofrece al OSD qué información adicional resulta útil para poder concluir este estado.

Si se confirmase el estado interrumpido, debido a la actuación permanente de un DP, se dará comienzo a las tareas de aislamiento de la sección afectada y reposición del suministro y, posteriormente, la localización y reparación del elemento fallado. El procedimiento sistemático propuesto para esta etapa de aislamiento del fallo y la reposición del suministro, se describirá en el siguiente capítulo, partiendo del conocimiento creado ([14, 66]) con toda la información disponible por el OSD hasta el momento, tanto la recibida como la adquirida.

A continuación se expone el planteamiento matemático que acompaña a esta metodología para la creación de conocimiento a partir de la señalización recibida de DP y DPF y de la información disponible sobre el estado de alimentación de clientes. Para esto consideramos un determinado circuito MT radial para el



que se conoce la matriz S de sucesores y los conjuntos \mathcal{P} , \mathcal{P}_s , \mathcal{P}_r , \mathcal{D} , \mathcal{D}_o , \mathcal{G} y \mathcal{L} , correspondientes a su grafo funcional, como se describió en el apartado 2.3.

3.2.1 Señalización de actuación de dispositivos de protección

Se define la matriz binaria C , de tamaño $n \times n$, que almacena la información estática sobre la relación entre cada DP y los elementos del circuito que en caso de fallo provocarían su actuación. Esta matriz es una extracción de S , de forma que $C_{ij} = 1$ cuando el fallo de $j \in \mathcal{N}$ provoca la actuación $i \in \mathcal{P}$. Como se refirió en el apartado ??, asumimos que todos los DP están debidamente coordinados, de forma que ante la aparición de una falta esta es despejada por el DP ubicado inmediatamente aguas arriba, por lo que $C_{ij} = 1$ cuando i sea el nudo de \mathcal{P} inmediatamente aguas arriba del nudo j . De la formulación presentada en el apéndice A.2.1, resulta la siguiente expresión algebraica para conseguir C :

$$C_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{cuando } [S(\mathcal{P}, \mathcal{P}) \cdot (S - I)]_{ij} = 1 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.1)$$

Nótese que esta expresión está levemente modificada respecto a la referida en la expresión (A.6) ya que la falta causada por el fallo de un DP, con la excepción del DP de cabecera del circuito, no pueda ser despejada por él mismo, $C_{ii} = 0$, sino que lo sería por el DP ubicado inmediatamente aguas arriba.

La Figura 3.1 muestra la matriz de sucesores S del grafo funcional del circuito de ejemplo presentado en el apartado 2.2. En esta representación de S no se muestran los elementos nulos y se han destacado en negrita los términos no nulos incluidos en C . Nótese que C_{x1} es un vector columna nulo ya que la falta causada por el fallo del DP en la cabecera del circuito, nudo 1, no es despejada por ningún otro DP en el circuito.

La frecuencia esperada de la actuación de un DP será la suma de las tasas de fallo de los elementos del circuito, parámetro almacenado en el vector r , cuyo fallo causa su actuación. Algebraicamente, la frecuencia esperada de la actuación del



Tabla 3.1 Nudos implicados en cada posible fallo.

Elemento cuyo fallo provoca la falta	DP que actúa en el despeje de la falta	CD interrumpidos
2,3,4,9,10,11,12,15,16,17,18,19	1	14,16,19,22,25
5,6,7,8,20,21,22,23	4	22,25
13,14	12	14
24,25	23	25

se ha asumido que ante la ocurrencia de un fallo, los dispositivos de protección mantienen fiablemente sus capacidades de señalización y reconexión. De esta forma, de un determinado DP con capacidad de señalización se obtiene conocimiento tanto de la recepción de señalización como de la ausencia de esta.

Sea Π el subconjunto de \mathcal{P}_s para los que se recibe señalización de su actuación. Si, como se ha considerado en los criterios operativos, estos dispositivos en un circuito están debidamente coordinados, este conjunto estará vacío o contendrá un único elemento. Se define el conjunto $\mathcal{T}_\Pi \subseteq \mathcal{P}$ que contiene los DP cuya actuación es compatible con la existencia de un estado de alimentación interrumpido y la información contenida en Π .

Así, cuando se reciba señalización de algún DP, $\text{nnz}(\Pi) = 1$, puede determinarse algebraicamente que $\mathcal{T}_\Pi = \Pi$. En caso contrario, en ausencia de señalización, $\text{nnz}(\Pi) = 0$, el estado interrumpido solo es compatible con la actuación de cualquier DP sin funcionalidad de señalización, por lo que $\mathcal{T}_\Pi = \mathcal{P} \setminus \mathcal{P}_s$.

3.2.2 Señalización de detectores de paso de falta

Para modelar el comportamiento de los detectores de paso de falta se ha considerado que estos dispositivos requieren ser excitados por el paso de la corriente de falta por su ubicación, desde una fuente energizada hacia el elemento en que se ha producido el fallo. Así, cualquier DPF detectará la corriente de falta con origen en la cabecera del circuito cuando el fallo este ubicado aguas abajo del DPF. Bajo este criterio, si el elemento que falla no está ubicado aguas abajo de un DPF, este solo detectará la corriente de falta si existe una GD aguas abajo.



Un FDP con funcionalidad de señalización direccional que tenga ubicado alguna GD aguas abajo podrá detectar la falta causada por el fallo de cualquier elemento en el circuito, aportando adicionalmente información de si este fallo está ubicado en la sección aguas abajo del DPF, o en la sección complementaria. En caso de este DPF no tenga ninguna GD aguas abajo, aportará la misma información que los DPF sin funcionalidad de señalización direccional, detectando únicamente faltas con dirección aguas abajo. Asumimos igualmente que cuando se recibe señalización de un DPF sin funcionalidad de señalización, cuando existe alguna GD aguas abajo, esta información permite obtener evidencia de la existencia de la falta pero pierde su utilidad para generar conocimiento sobre la ubicación relativa del elemento fallado.

De esta forma, para que un DPF pueda proporcionar información útil para determinar que la falta detectada está causada por el fallo de un elemento ubicado aguas abajo, se requiere que el DPF esté dotado de capacidad de señalización direccional, o que en caso contrario no exista ninguna GD aguas abajo. Cada DPF bajo este criterio se almacena en el subconjunto $\mathcal{D}_d \in \mathcal{D}$. Algebraicamente se cumple que $[D_d]_i = 1$ cuando $[D]_i = 1$ y en cualquiera de las siguientes dos condiciones correspondientes a los dos casos descritos: $i \in \mathcal{D}_o$ o $\text{mz}([S(\mathcal{D}, \mathcal{G})]_{ix}) = 0$. Se define el conjunto de señalización Δ_d que almacenará cada DPF en \mathcal{D}_d para el que se recibe señalización, con sentido aguas abajo en caso de dispositivos en \mathcal{D}_o .

Análogamente, la evidencia unívoca de la corriente de falta con sentido aguas arriba del DPF solo puede obtenerse de dispositivos en \mathcal{D}_o que tienen ubicado aguas abajo alguna GD. Estos DPF son almacenados en $\mathcal{D}_u \subseteq \mathcal{D}_o$, debiendo satisfacer que $[D_u]_i = 1$ cuando $\text{mz}([S(\mathcal{D}_o, \mathcal{G})]_{ix}) > 0$. Para almacenar esta señalización se define el conjunto de señalización Δ_u que contendrá cada DPF en \mathcal{D}_u del que se recibe señalización de paso de falta con sentido aguas arriba.

Al igual que se describió en el caso de un DP, se considera el comportamiento fiable de estos dispositivos de forma que la ausencia de señalización implica la incompatibilidad con las condiciones que la provocaría.

Se define el conjunto $\mathcal{F}_\Delta \subset \mathcal{N}$ de los nudos del grafo funcional cuyo fallo es



consistente con la señalización en Δ_d y Δ_u . Un nudo i estará contenido en \mathcal{F}_Δ cuando se cumplan simultáneamente las siguientes cuatro condiciones:

1. Está aguas abajo de todos los nudos en Δ_d :

$$[(S^t - I) \cdot \Delta_d]_i = \text{nnz}(\Delta_d)$$

2. No está aguas abajo de ningún nudo en \mathcal{D}_d que no esté en Δ_d :

$$[(S^t - I) \cdot (D_d \circ \overline{\Delta_d})]_i = 0$$

3. No está aguas abajo de ningún nudo en Δ_u :

$$[S^t \cdot \Delta_u]_i = 0$$

4. Está simultáneamente aguas abajo de todos los nudos en \mathcal{D}_u que no estén en Δ_u :

$$[S^t \cdot (D_u \circ \overline{\Delta_u})]_i = \text{nnz}(D_u \circ \overline{\Delta_u})$$

Se define el conjunto $\mathcal{T}_\Delta \subset \mathcal{P}$ que contiene cada DP cuya actuación es compatible con el despeje de la falta detectada por los DPF y por tanto causada por el fallo de cualquier elemento en \mathcal{F}_Δ . Algebraicamente, $[\mathcal{T}_\Delta]_i = 1$ cuando $[C \cdot F_\Delta]_i > 0$.

En la Tabla 3.2, para el circuito de ejemplo presentado en el apartado 2.2, en caso de fallo de cada nudo, se muestra el contenido de los conjuntos correspondientes a la señalización obtenida: Π , Δ_d , Δ_u y los conjuntos que contienen el conocimiento creado: \mathcal{T}_Π , \mathcal{T}_Δ .

3.2.3 Estado de alimentación de los centros de distribución

Para un circuito en estado interrumpido, el conjunto Λ_{off} contiene cada CD de \mathcal{L} para el que se conoce que su alimentación está interrumpida y en Λ_{on} se



Tabla 3.2 Conocimiento generado de la señalización de DP y DPF.

Elemento cuyo fallo provoca la falta	Π	Δ_d	Δ_u	\mathcal{T}_Π	\mathcal{T}_Δ
2,3,4,9,10,11,12,15,16,17,18,19	1	-	6	1	1,4,12
1,5,13,14,20,21,22,	-	-	6	4,12,23	4,12
7,8,23,24,25	-	6	-	4,12,23	4,23
6	-	-	-	4,12,23	4

almacenan los CD para los que se tiene constancia que mantiene su alimentación.

Se define el conjunto $\mathcal{T}_\Delta \subseteq \mathcal{P}$ que contiene cada DP cuya actuación es compatible con la información disponible en Λ_{off} y en Λ_{on} sobre el estado de alimentación de los CD.

Si la interrupción de los CD ha sido causada por la apertura de un determinado DP, este debe estar ubicado simultáneamente aguas arriba de todos CD en Λ_{off} . Recíprocamente, cualquier DP ubicado aguas arriba de cualquier CD en Λ_{on} debe tener su estado cerrado. Por lo tanto, $[T_\Delta]_i = 1$ cuando se cumple simultáneamente que

$$\begin{cases} \text{nnz}([S(\mathcal{P}, \Lambda_{off})]_{ix}) = \text{nnz}(\Lambda_{off}) \\ \text{nnz}([S(\mathcal{P}, \Lambda_{on})]_{ix}) = 0 \end{cases}$$

A diferencia del caso de recepción de señalización, la ausencia de información sobre el estado de un CD no aporta ningún conocimiento adicional.

Finalmente, se define el conjunto $\mathcal{T}_\Sigma \subseteq \mathcal{P}$ que contiene cada DP cuya actuación es compatible con toda la señalización recibida y la información disponible sobre el estado de alimentación de los CD. Este conjunto contendrá los DP comunes en los conjuntos $\mathcal{T}_\Pi, \mathcal{T}_\Delta$ y \mathcal{T}_Λ por lo que su vector asociado se determina según:

$$T_\Sigma = (T_\Pi \circ T_\Delta \circ T_\Lambda) \quad (3.2)$$



3.3 Aplicación a la identificación del estado interrumpido

En un circuito MT en estado normal, los conjuntos definidos para almacenar la señalización: Π , Δ_d y Δ_u y el conjunto de CD interrumpidos Λ_{off} estarán vacíos. En la Figura 3.2 se presenta el procedimiento propuesto para que el OSD puede determinar el estado de alimentación cuando reciba alguna alarma o evidencia de interrupción de clientes. El procedimiento comienza, como se ilustra en la parte superior de la Figura 3.2, por dos vías: por un lado cuando el OSD recibe señalización; o bien cuando en ausencia de señalización recibida, llegan un aviso de interrupción de clientes.

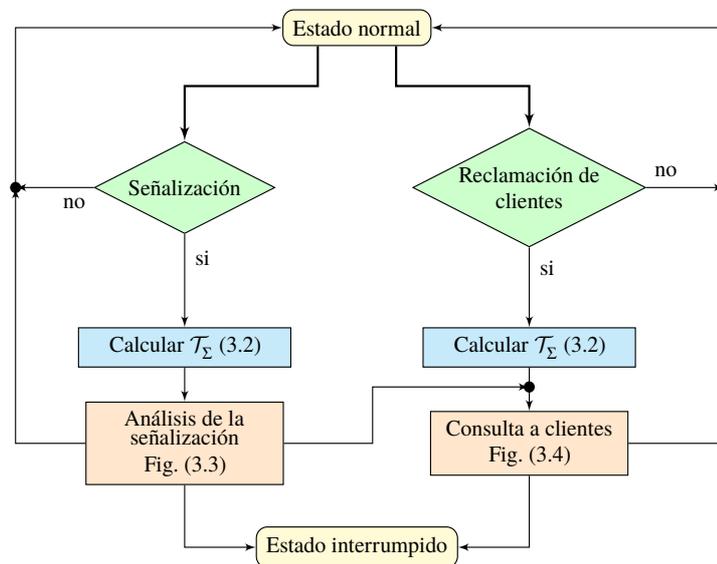


Figura 3.2 Procedimiento para la identificación del estado interrumpido.

En caso de iniciarse el procedimiento cuando el OSD recibe una señalización, se concluirá el estado normal cuando se determine que el DP que ha despejado la falta ha conseguido la reconexión automática de forma exitosa ante un fallo espurio. En caso de que se infiera de la información obtenida que el DP que ha actuado ante la falta inicial queda permanentemente abierto, se concluirá que el estado interrumpido del circuito. La recepción de señalización por permanencia del fallo tras los intentos de reconexión, o la ausencia de esta, se tratan en un



primer módulo de análisis de la señalización. Si la información disponible es insuficiente para determinar el estado de alimentación en este primer módulo, se acudirá a un segundo módulo de consulta a clientes en el que se podrá incrementar la información sobre el estado de alimentación de los CD que resulte útil para concluir el estado del circuito.

Cuando el procedimiento se inicia por la reclamación de algún cliente de su interrupción, la información proporcionada en ausencia de señalización se trata directamente en el segundo módulo. En este segundo caso se determinará si las interrupciones reclamadas son compatibles con la actuación permanente de un DP y por tanto el circuito está en estado interrumpido. En caso contrario, se concluirá el estado normal por lo que la interrupción reclamada se limita al CD del que parte el aviso. Se asume que el tiempo transcurrido desde la ocurrencia de la falta que provoca la interrupción hasta su reclamación por los clientes afectados es superior a los tiempos de actuación de las reconexiones, si se hubiesen dado. Por tanto en este caso no se considera la posibilidad de reconexión exitosa posterior a la recepción de la reclamación. Obviamente, en ausencia de señalización de la falta inicial no habría existido señalización tras las sucesivas faltas en los intentos de reconexión.

El conocimiento adicional adquirido en el procedimiento de identificación del estado de alimentación, se almacena adicionalmente al creado con de la información inicial, para ser utilizado en etapas posteriores.

3.3.1 Módulo de análisis de la señalización

Cuando el OSD recibe señalización que evidencia la existencia de una falta, debe calcular \mathcal{T}_{Σ} según (3.2) antes de entrar en el módulo de análisis de la señalización. En lo sucesivo, en cada actualización de \mathcal{T}_{Σ} se utilizará toda la información disponible hasta ese momento. Este módulo de análisis de la señalización, ilustrado en la Figura 3.3, tiene tres posibles salidas: la izquierda cuando se concluye con la identificación del estado normal, la inferior cuando queda identificado el estado interrumpido y la derecha cuando se requiere acudir al siguiente módulo antes de alcanzar una conclusión.



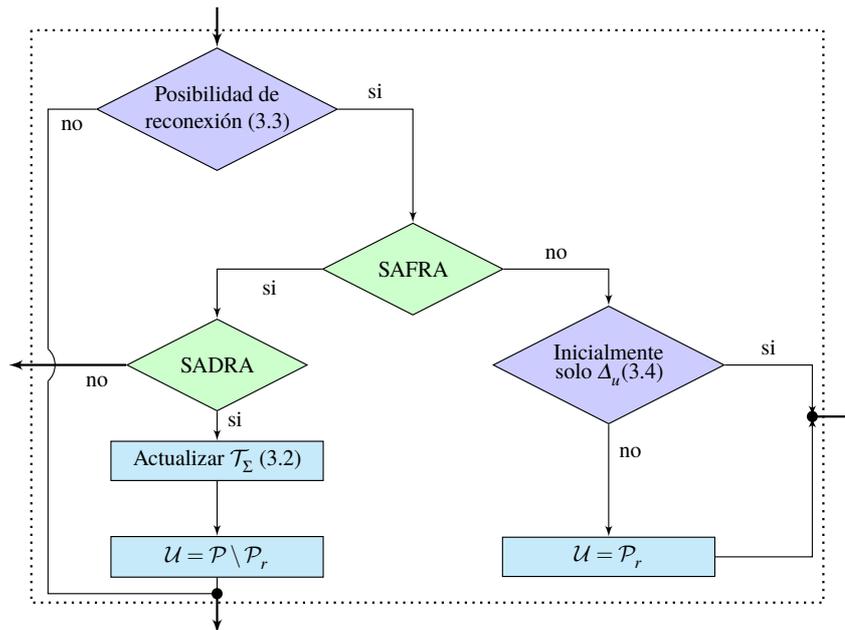


Figura 3.3 Módulo de análisis de la señalización.

Cuando se satisface la expresión (3.3), entre los DP contenidos en \mathcal{T}_Σ existe al menos uno con capacidad de reconexión automática, por lo que es posible que haya existido reconexión automática tras la falta inicial.

$$(\mathcal{T}_\Sigma)^t \cdot P_r > 0 \quad (3.3)$$

En caso que no se cumpla (3.3) se concluye que la corriente de falta habrá provocado la actuación permanente de un DP y, por tanto, el estado interrumpido del circuito, lo que corresponde a la salida inferior del módulo. En el caso contrario, si existe la posibilidad de que haya ocurrido un intento de reconexión de un DP habrá que atender a si se obtiene o no señalización posterior al intento de reconexión.

Asumimos, por simplicidad de la exposición, que los DP se han configurado para realizar dos intentos de reconexión, un primer intento rápido (fast attempt) y un segundo intento demorado (delayed attempt). Si cumpliéndose (3.3) se vuelve a recibir señalización tras el primer intento rápido (SAFRA - Signaling After a Fast Reclosing Attempt), puede concluirse que las condiciones del fallo se mantienen y que el DP que ha actuado inicialmente es, entre los considerados en \mathcal{T}_Σ , uno con



funcionalidad de reconexión.

Con este conocimiento adicional la recepción o ausencia de señalización tras el segundo intento de reconexión (SADRA - Signaling After Delayed Reclosing Attempt) es suficiente para concluir que el estado, normal o interrumpido, por reconexión en este segundo intento. Para almacenar este conocimiento adicional, conseguido de la interpretación de haber recibido, o no, señalización tras los intentos de reconexión automática, se define el conjunto \mathcal{U} . Este conjunto, vacío al comenzar el procedimiento, contendrá cada DP cuya actuación no es compatible con la existencia del estado interrumpido del circuito.

Nótese que, como se refirió en el apartado 3.2.2, asumimos que ante la aparición de la corriente de falta inicial se desconecta todo la GD aguas abajo del DP que la despeja, por lo que la permanencia del fallo tras los sucesivos intentos de reconexión puede proporcionar señalización diferente a la inicial. Puede darse el caso de que SAFRA ofrezca alguna información útil adicional a la que proporcionó la señalización inicial. Este es el caso de un DPF sin funcionalidad de señalización direccional con GD operativa aguas abajo en el momento de la falta inicial, y que deben ser considerados en \mathcal{D}_d para procesar Δ_d recibido con SAFRA. Justificado por la posibilidad de incrementar el conocimiento, en la salida inferior de este módulo se requiere de forma genérica actualizar \mathcal{T}_Σ utilizando (3.2).

Volviendo a la aparición de SADRA, en caso que esta no se reciba, puesto que las condiciones bajo la permanencia del fallo son las mismas que existían en la recepción de SAFRA, se concluye de que esta segunda reconexión ha sido exitosa. Por tanto se identifica el estado normal en el circuito abandonando este módulo por su salida izquierda.

Cuando se cumple (3.3) pero no se recibe SAFRA deben considerarse tres posibles situaciones alternativas. La primera es que el estado del circuito sea normal por reconexión exitosa de un DP, entre los considerados en \mathcal{T}_Σ , con funcionalidad de reconexión. Una segunda situación corresponde a un estado interrumpido por actuación ante la falta inicial de un DP sin capacidad de reconexión automática. Finalmente, la tercera situación corresponde a cuando el DP que despeja la falta ha realizado el primer intento de reconexión de forma fallida, pero la desconexión



previa de la GD provoca que tras este intento no se reciba señalización. Esta última situación solo es posible cuando la señalización inicial solo ha sido recibida de DPF en \mathcal{D}_u , esto es, señalización almacenada en Δ_u . Esta condición puede determinarse algebraicamente como:

$$\text{nnz}(\Pi + \Delta_d) = 0 \quad (3.4)$$

Si no se satisface (3.4) se descarta la tercera situación referida anteriormente y, por tanto, el posible estado interrumpido solo sería compatible con la actuación de un DP sin funcionalidad de reconexión. En este caso, este conocimiento adicional se almacena en \mathcal{U} antes de alcanzar el segundo bloque. Alcanzada la salida derecha de este módulo, como se aprecia en la Figura 3.2, se entra en el módulo de consulta a clientes, donde se sigue procesando la información disponible.

3.3.2 Módulo de consultas a clientes

Al siguiente módulo de consulta a clientes, presentado en la Figura 3.4, se llega por dos caminos. El primero es la salida derecha del módulo de análisis de la señalización, expuesto en 3.3.1, cuando la ausencia de SAFRA es compatible con una reconexión automática exitosa y con la actuación permanente de un DP sin capacidad de reconexión. Al llegar al módulo de consulta a clientes por este camino puede haberse creado un conocimiento adicional, almacenado en \mathcal{U} , en caso que no se cumpla (3.4). En caso contrario, si se cumple (3.4) el conjunto \mathcal{U} seguirá vacío a la entrada de este módulo.

El otro camino de entrada a este módulo corresponde a la situación en la que el procedimiento de identificación del estado de alimentación del circuito se inicia por la reclamación de clientes al tener interrumpida su alimentación. En este caso, en ausencia de señalización, los conjuntos Π , Δ_d , Δ_u , Λ_{on} y \mathcal{U} estarán vacíos. El conjunto Λ_{off} incluirá los CD que alimentan a los clientes cuya reclamación inicia la ejecución del procedimiento.

En la entrada del módulo se comprueba si se cumple la condición recogida en la



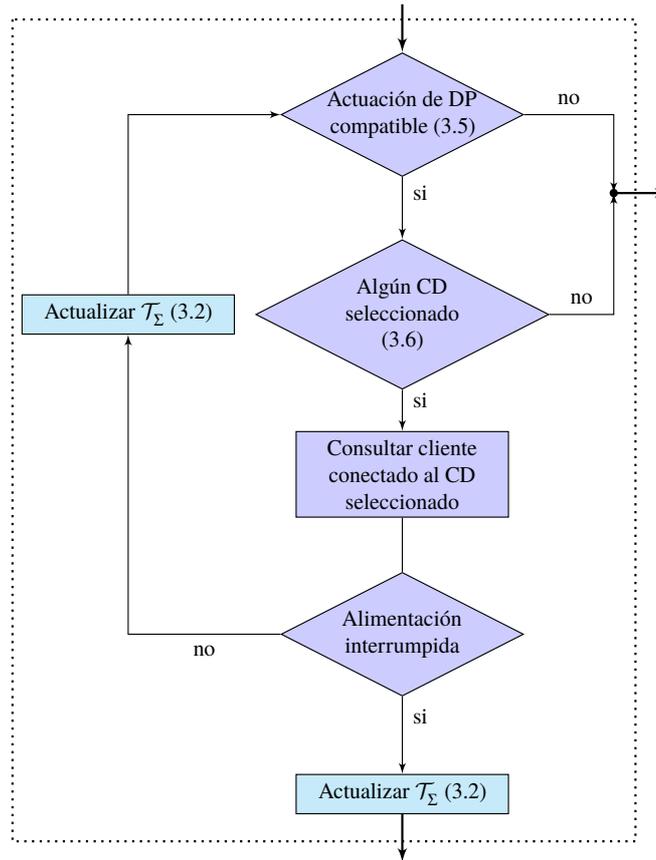


Figura 3.4 Módulo de consulta a clientes.

expresión (3.5). En caso de que no se cumpla (3.5), el módulo se abandona por su salida derecha ya que el conocimiento creado hasta el momento no es compatible con la actuación de ningún DP, concluyéndose el estado normal del circuito.

En caso contrario, cuando se cumple la expresión (3.5), existe algún DP en $(\mathcal{T}_\Sigma \setminus \mathcal{U}, \mathcal{L})$ cuya actuación es compatible con la información disponible y por tanto existe la posibilidad de que exista una interrupción. En este caso, la conclusión sobre el estado del circuito solo se alcanzará adquiriendo información adicional sobre el estado de alimentación de algún CD.

$$(\mathcal{T}_\Sigma)^t \cdot U < \text{nnz}(\mathcal{T}_\Sigma) \quad (3.5)$$

En 3.2.1 se presentó la expresión algebraica que determina la frecuencia esperada



de la interrupción del CD $j \in \mathcal{L}$ como la suma de las tasas de fallo de los elementos cuyo fallo provoque la actuación de cualquier DP que interrumpa la alimentación del CD. De esto, considerando todo el conocimiento creado hasta el momento y bajo la hipótesis de la existencia de una interrupción permanente en el circuito, el vector obtenido con la siguiente expresión contiene en su término i -ésimo un valor proporcional a la probabilidad de que el CD i estuviese afectado de la interrupción,

$$(S(\mathcal{T}_\Sigma \setminus \mathcal{U}, \mathcal{L}))^t \cdot C \cdot (r \circ F_\Delta) \quad (3.6)$$

Así, el CD correspondiente al término con mayor valor positivo en (3.6) será aquel que, en caso que el estado del circuito sea interrumpido, tendría una mayor probabilidad de estar afectado de esta interrupción. Se seleccionará, para consultar a los clientes que alimenta, el CD no contenido en Λ_{off} que presente un mayor valor positivo en (3.6).

Tras consultar a los clientes alimentados por este CD sobre la continuidad de su suministro, si la respuesta es que tienen interrumpida su alimentación, se concluye el estado interrumpido. Antes de abandonar este módulo por la salida inferior, se actualiza \mathcal{T}_Σ con la nueva información adquirida. Nótese que \mathcal{T}_Σ puede contener en este momento más de un DP, es decir, es posible que llegándose a confirmar el estado interrumpido, aún no se haya identificado el DP que ha causado la interrupción al despejar la falta.

Si por el contrario la respuesta de los clientes consultados es que mantienen su alimentación, se requiere volver a comprobar (3.5) previa actualización de \mathcal{T}_Σ según (3.2). Necesariamente, la nueva información adquirida sobre el estado de alimentación del CD seleccionado debe servir para descartar algún DP contenido en \mathcal{T}_Σ . En caso de que la condición (3.5) deje de cumplirse o (3.6) no ofrezca ningún CD que seleccionar, se concluye que el estado de alimentación debe de ser normal, con lo que se abandona este módulo por su salida derecha.

Cuando la expresión (3.6) obtiene el mismo valor máximo positivo para más de un CD, la respuesta de cualquiera de los clientes alimentados desde cualquiera de estos tiene la misma utilidad. En estos casos pueden considerarse criterios



de selección adicionales, como por ejemplo, aquellos para los que se prevea una respuesta más rápida o fiable. Obviamente también puede considerarse criterios de redundancia en la respuesta, estableciendo la necesidad de confirmación de varios clientes.

3.3.3 Identificación del conjunto de nudos sospechosos

Una vez se concluye la existencia del estado interrumpido de un circuito es posible determinar el conjunto de los nudos del grafo funcional cuyo fallo, [68], es compatible con todo el conocimiento creado, y que por tanto contiene al elemento que realmente ha fallado. Este conjunto, definido como conjunto de nudos sospechosos (SNS - suspicious node set) se denota como $\mathcal{F}_\Sigma \subset \mathcal{N}$ y puede determinarse algebraicamente según la expresión:

$$F_\Sigma = (C^t \cdot (T_\Sigma \circ \bar{U})) \circ F_\Delta \quad (3.7)$$

3.3.4 Ejemplo. Casos de alerta por señalización

En la Tabla 3.3 se muestra el resultado de la aplicación del procedimiento de identificación del estado de alimentación en el circuito de ejemplo presentado en el apartado 2.2, cuya representación unifilar se ilustra de nuevo en la Figura 3.5 a fin de facilitar el seguimiento por parte del lector. Las tres primeras columnas recogen todas las combinaciones de señalización que podría recibir el OSD en caso de falta, asociada a los correspondientes conjuntos Π , Δ_d , Δ_u). La cuarta columna muestra el cumplimiento de (3.3), condición que es comprobada en la entrada del módulo de análisis de la señalización y que se cumple en todos los casos. En las columnas quinta y sexta se relacionan los posibles resultados de recepción de señalización tras los intentos de reposición, SAFRA y SADRA, y cuando aplica, se muestra en la séptima columna el resultado de la condición (3.4). En caso de llegarse a alcanzar el módulo de consultas a clientes descrito en el apartado 3.3.2, la octava columna muestra las secuencias de CD seleccionados para consultar a sus clientes y dentro del paréntesis, las posibles respuestas obtenidas. Finalmente, la columna



novena muestra el estado de alimentación concluido en cada caso, y cuando es este el estado interrumpido, en la columna décima se muestra el SNS que llega a ser determinado.

Tabla 3.3 Casos de ejemplo de alerta por señalización.

Π	Δ_d	Δ_u	(3.3)	SAFRA	SADRA	(3.4)	CD seleccionados (respuesta)	Estado alimentación	\mathcal{F}_Σ
1		6	Si	Si	Si	-	-	Interrumpido	2,3,4,9,10,11,12,15,16,17,18,19
				No	-	-	-	Normal	-
				No	-	No	-	Normal	-
-	6	-	Si	Si	Si	-	-	Interrumpido	7,8,23
				No	-	-	-	Normal	-
				No	-	No	25(on)	Normal	-
							25(off)	Interrumpido	24,25
-	-	6	Si	No	-	Si	25(off)	Interrumpido	5,20,21,22
							25(on),14(off)	Interrumpido	13,14
							25(on),14(on)	Normal	-

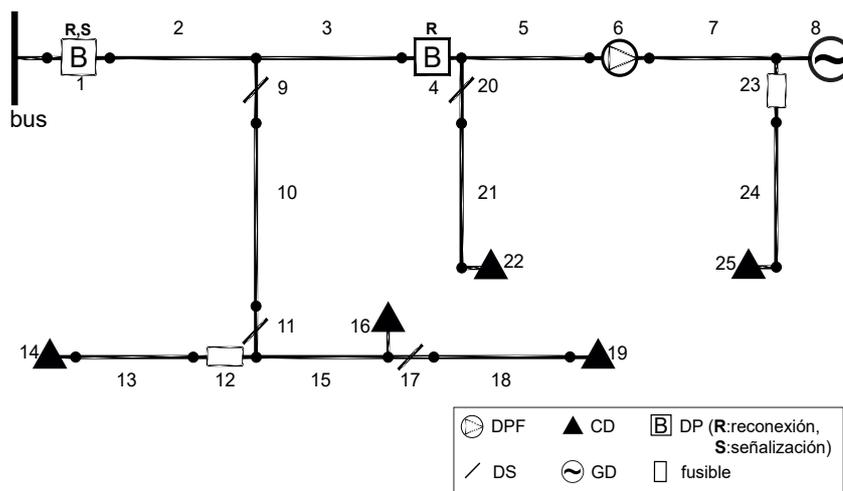


Figura 3.5 Representación unifilar del circuito de ejemplo.

Tomando como ejemplo el caso de un fallo en el tramo 5, el OSD recibiría señalización únicamente desde el DPF 6 con sentido aguas arriba, $\Delta_u = \{6\}$, como se muestra en el último bloque de la Tabla 3.3. En este caso la expresión (3.3) siempre se cumple ya que con las señalización inicial se tiene $\mathcal{T}_\Sigma = \{4,12\}$ y el DP 4 tiene capacidad de reconexión. Debido a la desconexión de la GD en 8, no



se obtendrá recepción de SAFRA en ningún caso, lo que se tiene en cuenta por el cumplimiento de (3.4). Llegándose al módulo de consulta a clientes, el CD 25 será seleccionado para consultar a los clientes que alimenta. En caso de que las primeras consultan no concluyan el estado interrumpido, estas continuarán sobre los clientes alimentados desde el CD 14, seleccionado en segundo lugar tras descartarse el DP 4 de \mathcal{T}_Σ . Si finalmente todos los clientes consultados confirman que mantienen su alimentación, se concluirá el estado normal de circuito por reconexión exitosa del DP 4.

Nótese cómo el conocimiento adicional creado en el transcurso del procedimiento, sea por la recepción de señalización SAFRA y SADRA, como por la información adquirida sobre el estado de alimentación de clientes, es mayor que el que podría inferirse de la correspondencia entre fallos y señalización que se mostró en la Tabla 3.2.

3.3.5 Ejemplo. Casos de alerta por reclamación de clientes

En la Tabla 3.4 se muestra el resultado del proceso de identificación del estado de alimentación para el circuito de ejemplo presentado en el apartado 2.2, cuando se inicia con la reclamación de clientes sobre su interrupción. La primera columna muestra el identificador del CD que alimenta a los clientes que reclaman su interrupción, el cual determina el conjunto Λ_{off} a la entrada del procedimiento.

Dependiendo de que la GD 8 esté o no operativa, lo que se indica en la segunda columna, la tercera columna muestra el cumplimiento de (3.5) en la entrada del módulo de consulta a clientes. Esta condición no se cumplirá cuando el cálculo inicial de \mathcal{T}_Σ resulte un conjunto vacío, lo que implica que la interrupción reclamada no es compatible con la actuación de un DP ante una falta sin señalización y por tanto se concluye el estado normal. Este es el caso en el que la reclamación de interrupción se recibe desde clientes alimentados desde los CD 16 o 19, cuya interrupción necesariamente estaría asociada a la señalización por actuación del DP 1.

En caso contrario, si \mathcal{T}_Σ contiene algún DP, el conocimiento creado a la entrada



del módulo es compatible con una interrupción del circuito MT, por lo que se requerirá consultar a otros clientes. En la cuarta columna se muestran el CD seleccionado, según se describe en el apartado 3.3.2, asumiendo tasas de fallo constantes para todos los elementos. La columna quinta contiene la conclusión alcanzada sobre el estado de alimentación dependiendo de la respuesta de los clientes consultados cuando es el caso, y cuando resulta ser el estado interrumpido, la última columna relaciona los nudos en el SNS.

Tabla 3.4 Casos de ejemplo de alerta por reclamación de clientes.

A_{off} inicial	Estado GD	(3.5)	CD seleccionados (respuesta)	Estado alimentación	\mathcal{F}_{Σ}
22	On	Si	25(off)	Interrumpido	6
			25(on)	Normal	-
	Off	Si	25(off)	Interrumpido	5,6,20,21,22
			25(on)	Normal	-
25	On	Si	22(off)	Interrumpido	6
			22(on)	Normal	-
	Off	Si	22(off)	Interrumpido	5,6,20,21,22
			22(on)	Normal	-
14	On	No	-	Normal	-
	Off	Si	-	Interrumpido	13,14
16	-	No	-	Normal	-
19	-	No	-	Normal	-

En el caso particular de fallo permanente en el tramo 5, se habría producido la actuación del DP 4, interrumpiéndose la alimentación de los CD 22 y 25. En caso de que la GD en 8 no hubiese estado operativa en el momento del fallo, el OSD no habría recibido señalización y por tanto no tendría conocimiento de la interrupción. En esta situación cuando se reciben reclamaciones de los clientes alimentados desde uno de los dos CD afectados, tras verificarse el cumplimiento de (3.5) por la posible actuación del DP 4, se selecciona el otro CD para consultar a los clientes que alimenta. En caso de quedar confirmada la interrupción el SNS se extiende a los elementos que provocan la actuación del DP 4 y no están aguas abajo del DPF 6.

Nótese que cuando la reclamación procede de clientes alimentados desde el CD 14 y la GD no está operativa, se concluye el estado interrumpido al ser compatible con la actuación del DP 12 no existe otro CD al que consultar a sus clientes para



verificarlo.

Adicionalmente al ejemplo presentado, en el apéndice C.2, se describen varios casos sobre un nuevo ejemplo de red real MT, para ilustrar la utilidad de la metodología presentada en este capítulo en servir al OSD en la identificación del estado de alimentación.

3.4 Consideraciones para la ampliación de la metodología presentada

La metodología propuesta se ha presentado bajo una serie de suposiciones y simplificaciones para favorecer una exposición más didáctica y amplia. En este apartado se exponen las consideraciones necesarias para superar estas simplificaciones y para modelar el comportamiento de otros dispositivos de protección y señalización utilizadas en las redes de distribución reales.

3.4.1 Fallos de los detectores de paso de falta

En la descripción realizada en 3.2.1 para construir la matriz C a partir de la matriz de sucesores, se ha considerado que el fallo de un DPF, como cualquier otro elemento del circuito, provocaría la actuación de DP ubicado inmediatamente aguas arriba. Para el circuito de ejemplo mostrado en la Figura 2.1 puede observarse que $[C]_{4,6} = 1$, por lo que el DP 4 actuaría ante la falta ocasionada por el fallo del DPF 6. En el caso de que se considere modelar que el fallo de estos dispositivos solo afecta a su funcionamiento pero en ningún caso provocaría una situación de falta en el circuito, puede forzarse que $[C]_{xi} = 0$ para cada DPF i sin perjuicio de la validez y utilidad de la metodología presentada.



3.4.2 Fiabilidad de la capacidad de señalización de los dispositivos

En la metodología desarrollada se ha asumido que ante la ocurrencia de un fallo los dispositivos con capacidad de señalización realizarán esta función fiablemente, lo que supone que la ausencia de señalización sirve para crear conocimiento sobre la posible existencia de un fallo. Cuando la interpretación del conocimiento creado lleva a una conclusión incoherente, o el OSD sospecha del fallo en la recepción de señalización, puede omitirse utilizar esta información en la creación de conocimiento. Para esto, basta con omitir estos dispositivos de los conjuntos \mathcal{P}_s , \mathcal{D}_d o \mathcal{D}_u .

Un ejemplo en el que se podría prescindir de la información aportada por la señalización, sería cuando se reciben reclamaciones de clientes por interrupción de su alimentación. Cuando el procedimiento de identificación del estado del circuito se inicia por reclamaciones de clientes, no habrá existido señalización previa que haya alertado al OSD sobre la existencia de una falta. Si de un primer análisis se concluye el estado normal por incompatibilidad de la ausencia de señalización con la actuación de un DP, podría repetirse el procedimiento obviando las capacidades de señalización de los dispositivos para contrastar la hipótesis mediante la consulta a clientes de otros CD propuestos.

Para el circuito de ejemplo presentado en el apartado 2.2, una situación compatible con esta exposición se daría cuando se produce un fallo permanente en 21 con actuación del DP en 4 en un momento en el que el OSD cree que la GD está operativa pero realmente no lo está. La interrupción es reclamada por clientes en el CD 25 y, considerando que se descarta que el fallo del propio DPF haya provocado la falta, se concluye inicialmente el estado normal por incompatibilidad del conocimiento creado a partir de la ausencia de señalización con la interrupción reclamada. El OSD decide repetir el procedimiento de identificación del estado de alimentación prescindiendo de la información aportada por el DPF, $\mathcal{D}_u = \emptyset$, de lo que resulta la selección del CD 22 para consultar a sus clientes. La respuesta de estos clientes es suficiente para concluir el estado de alimentación del circuito que en caso de ser el estado interrumpido, confirma la hipótesis sobre el DPF.

Otro ejemplo sobre este mismo circuito, sería cuando se recibe la reclamación



de los clientes alimentados desde el CD 19 con la GD no operativa, sin que se hubiese recibido señalización de la actuación del DP 1. Ante el incumplimiento de (3.5) se concluye el estado normal ya que la interrupción de 19 solo estaría justificada por la actuación del DP 1, por lo que se decide repetir el procedimiento de identificación del estado de alimentación prescindiendo de 1 en \mathcal{P}_s . Con esta modificación se cumple (3.5) en la entrada al módulo de consulta a clientes, llegándose a proponer la consulta de los clientes del CD 25. En caso de que los clientes consultados estuviesen sin servicio, se concluye el estado interrumpido y el fallo en la señalización de 1 o por la rotura de la línea sin corriente de falta en el camino troncal del CD 19.

3.4.3 Fiabilidad en la capacidad de reconexión de los dispositivos de protección

Cuando un determinado DP para el que se asuma capacidad de reconexión actúa en el despeje de una falta que genere señalización pero no llega a realizar la reconexión automáticamente prevista, la ausencia de SAFRA podría llevar al OSD a conclusiones erróneas. En el caso más simple, si este DP fuese el único en \mathcal{T}_2 en una situación de alerta por señalización, no se obtendría SAFRA aun cuando el fallo fuese permanente. El cumplimiento de (3.4) y posteriormente el incumplimiento de (3.5) llevaría a la conclusión de que el estado debe ser normal por reconexión exitosa del elemento que realmente no ha llegado a reconectar. Si existiesen dudas acerca de la disponibilidad de la capacidad de reconexión, como se describió en el apartado anterior, se podría repetir el procedimiento de identificación del estado de alimentación prescindiendo de esta capacidad. Esto llevaría a que el procedimiento propusiese un CD para consultar a los clientes que alimenta para así asegurarse de si efectivamente el estado es normal.

3.4.4 Ampliación de la metodología a otros dispositivos

En este apartado se amplía la descripción metodológica presentada a otros dispositivos de protección y señalización presentes en las redes actuales de distribución.



Seccionalizadores

El seccionalizador es un dispositivo de seccionamiento que actúa automáticamente aislando la sección de red aguas abajo cuando esta contiene un elemento que provoca una falta. A diferencia del comportamiento descrito previamente para los DP, que actúan inmediatamente ante el paso de corriente de falta, los seccionalizadores están programados para actuar cuando detectan el paso de falta un determinado número de veces.

Típicamente estos dispositivos están ubicado aguas abajo de un DP con capacidad de reconexión configurado para realizar más de un intento de reconexión. El seccionalizador puede detectar la interrupción de la corriente por actuación del DP aguas arriba, lo que le permite contar el número de intentos de reconexión que este ha realizado. Los primeros intentos de reconexión pretenden la reposición de todo el suministro cuando las condiciones del fallo son espurios. Si la falta se mantiene tras los primeros intentos, en ausencia de tensión y antes del último intento de reconexión, el seccionalizador actúa abriéndose y por tanto deslastrando la sección que tiene aguas abajo. Si la última reconexión tiene éxito, ya con el seccionalizador abierto, se concluye que el fallo se encuentra aguas abajo del seccionalizador. En caso contrario, si se mantiene la falta, se adquiere el conocimiento de que el fallo se encuentra en la sección de red entre el DP con reconexión y el seccionalizador.

Con esta estrategia se consigue extender el beneficio conseguido con la instalación de DP con reconexión, de forma que en algunos casos se evita la interrupción de parte del suministro cuando el fallo se ubica aguas abajo del seccionalizador. En cualquier caso, cuando el fallo es permanente, se adquiere información sobre su ubicación. Los seccionalizadores actúan en ausencia de tensión por lo que son constructivamente más sencillos que un interruptor.

Para integrar los seccionalizadores en la metodología descrita en este capítulo, estos se incorporan como un DP más en el conjunto \mathcal{P} . Para identificarlos en su capacidad característica, se define un subconjunto $\mathcal{P}_c \in \mathcal{P}$, disjunto de \mathcal{P}_r y \mathcal{P}_s . Adicionalmente, se requiere realizar dos modificaciones en la metodología presentada que afectan a las expresiones que determinan los conjuntos \mathcal{T}_{Π} y \mathcal{T}_{Δ} , y al módulo de análisis de la señalización descrito en la Figura 3.3 dentro del



procedimiento de identificación del estado de alimentación.

La primera modificación está justificada por el hecho de que cuando un DP con funcionalidad de reconexión automática se incluye en \mathcal{T}_{Π} por recepción de su señalización, se incluirán también los seccionalizadores que estén ubicados inmediatamente aguas abajo. Igualmente, si un reconectador no está en \mathcal{T}_{Π} tampoco lo estarán sus seccionalizadores asociados. Por esto se modifican las expresiones descritas en 3.2.1 de la siguiente forma:

$$\mathcal{T}_{\Pi} = \begin{cases} (I + \text{diag}(P_c) \cdot C^t \cdot \text{diag}(P_r)) \cdot \Pi & \text{cuando } \text{nnz}(\Pi) = 1 \\ P - (I + \text{diag}(P_c) \cdot C^t) \cdot (P_s \circ P_r) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.8)$$

La expresión que determina \mathcal{T}_{Σ} requiere ser modificada para que, en caso de que incluya un seccionizador, también incluya en cualquier caso el DP con reconexión ubicado aguas arriba. Por tanto, posteriormente al cálculo de \mathcal{T}_{Δ} según se describe en 3.2.2, debe imponerse que $[\mathcal{T}_{\Delta}]_i = 1$ cuando $[(I + \text{diag}(P_r) \cdot C \cdot \text{diag}(P_c)) \cdot (C \cdot F_{\Delta})]_i > 0$.

Por último se requiere que el procedimiento ilustrado en la Figura 3.3 para el módulo de análisis de la señalización, se modifique según se muestra en la Figura 3.6. En este procedimiento modificado, en el que se asume a modo de ejemplo que un DP con funcionalidad de reconexión automático realizará tres intentos de reconexión, se observan dos principales cambios:

1. Si no se recibe SAFRA y no se cumple (3.4) la única posibilidad es que el fallo sea permanente por actuación de un DP sin capacidad de reconexión o que el estado sea normal por reconexión exitosa. En cualquier caso, cualquier reconectador o seccionizador permanecerá cerrado.
2. Si no se recibe señalización tras el segundo intento de reconexión (SADRA 1), se concluye el estado normal tras el éxito de esta reconexión, dado que aún no habrá abierto ningún seccionizador. En caso contrario, cuando se reciba SADRA 1, si existe un seccionizador coordinado con el DP que ha



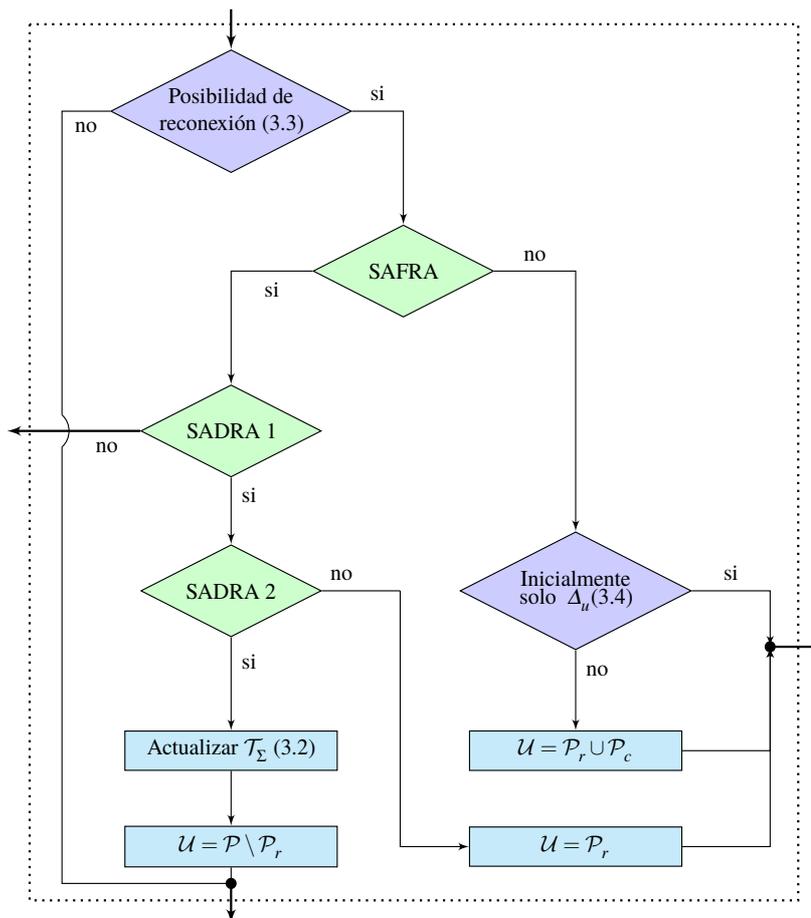


Figura 3.6 Módulo de análisis de la señalización modificado.

actuado, este abrirá antes del siguiente intento de reconexión.

- Si tras el último intento de reconexión no se recibe señalización (SADRA 2), ya no se concluirá en cualquier caso el estado normal por reconexión exitosa. Ahora es posible que el fallo haya quedado aislado por la actuación de un seccionalizador. Por tanto el estado puede ser normal si la reconexión ha sido exitosa por un reconectador sin seccionalizadores o interrumpido si la falta ha sido aislada por un seccionalizador.

En cualquiera de los casos en los que el módulo de análisis de la señalización sea abandonado por su salida derecha, el estado se resolverá en el módulo de consulta a clientes, que no requiere modificaciones para considerar la integración de seccionalizadores.



Otros dispositivos de detección de faltas

En el apartado 3.2.2 se expuso que para modelar el comportamiento de los DPF se asumía que estos dispositivos requieren ser excitados por el paso de la corriente de falta. Este criterio permite exponer la metodología de detección del estado de alimentación de una forma más general teniendo en cuenta el estado inicial de la GD y su desconexión tras la ocurrencia de una falta.

La consideración de otros elementos de detección de situaciones de falta mediante el análisis de la onda eléctrica (sincrofasor o PMU) requiere introducir algunas modificaciones que son básicamente una simplificación de la metodología ya expuesta. Supondremos que estos dispositivos, [69], distribuidos permiten al OSD disponer de una señalización direccional de la ubicación del fallo sin depender de la existencia de fuentes distribuidas en el circuito. En caso de aparición de una falta, estos dispositivos señalarán coordinadamente si la ubicación del fallo se encuentra en la sección de red aguas abajo de su ubicación o en la sección complementaria.

Para integrar estos dispositivos de detección en el procedimiento presentado, se reformulará las condiciones descritas en 3.2.2 para configurar los conjuntos \mathcal{D}_d y \mathcal{D}_u , de forma que estos dispositivos estarán en cualquier caso incluidos en ambos conjuntos. Adicionalmente, se considerará siempre el cumplimiento de (3.4) en el módulo de análisis de la señalización descrito en la Figura 3.3 como parte del procedimiento de identificación del estado de alimentación. Esta modificación está justificada en el hecho de que se espera que la señalización de los PMU en la falta inicial se reproduzca de nuevo en la señalización tras cada reconexión fallida, sin verse afectada por la desconexión de la GD.

3.5 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un procedimiento sistemático para la identificación de la interrupción permanente del suministro de un circuito MT radial, ante la recepción de alertas, por señalización y reclamación de clientes, así como



la creación de conocimiento sobre la ubicación del fallo antes de iniciar las tareas de localización, reposición del suministro y reparación del fallo.

Empleando el planteamiento matemático propuesto en este trabajo, se definen inicialmente las expresiones que permiten generar conocimiento sobre la posible ubicación de un fallo a partir de la señalización recibida desde los dispositivos de protección, detectores de paso de falta y evidencias de interrupción recibidas de clientes.

La exposición teórica se desarrolla asumiendo una serie de simplificaciones, en aras de favorecer una exposición más didáctica y amplia, que suponen el comportamiento idealizado ([19, 17]) de las funcionalidades de los DP (comportamiento fiable, coordinación, etc.), así como ciertas restricciones en el comportamiento de los DPF. En el apartado 3.4.4 se han expuesto las variaciones requeridas en la metodología para superar estas simplificaciones y para modelar el comportamiento de otros dispositivos.

El procedimiento se inicia con la recepción de la alerta de una falta, y concluye con la identificación del estado normal o interrumpido del circuito, a partir del conocimiento creado con la información disponible desde la señalización y evidencias de la discontinuidad en la alimentación de clientes. Se ha presentado un criterio de selección de los clientes cuyo estado de alimentación supone una información útil en la creación de conocimiento adicional, cuando este se requiere para identificar el estado del circuito. Esta aplicación resulta muy relevante en un paradigma de integración total de los equipos de medida telegestionados, en la que estos dispositivos pueden dar información sobre su estado de alimentación cuando son consultados remotamente por el OSD, e incluso alertar automáticamente de su interrupción del suministro. Un sistema de alertas de interrupción soportado por la información ofrecida por estos dispositivos permitiría reducir los tiempos de reacción del OSD y crear más conocimiento sobre la extensión de la interrupción. Las infraestructuras de comunicación existentes para los procesos de captación remota de la medida podrían ser adaptadas a este fin a un coste inferior del requerido en el despliegue de más señalizadores.

Hay que destacar que el OSD emplearía esta metodología en los instantes



posteriores a la recepción de señalización de falta o evidencias de interrupción. En cualquier caso, el procedimiento presentado gestionará la información disponible con posterioridad a cualquier actuación automática de los dispositivos del circuito.

La implementación computacional de esta metodología ofrece sus conclusiones en tiempos muy reducidos, sobradamente suficientes para el servicio que pretende. La tarea computacional más exigente en el marco propuesto, es el cálculo de la matriz S . Aun pudiendo disponer de esta matriz precalculada, su cálculo para un tamaño del grafo funcional representativo de los circuitos más extensos que pueden encontrarse en las redes de distribución, no consume más de 5 milisegundos en un ordenador con microprocesador 3.20-GHz, Intel Core™ i5-4460. Haciendo uso de estructuras dispersas, los tiempos de ejecución del procedimiento de identificación del estado de alimentación resultan inferiores a 1 milisegundo en este mismo equipo. En el apéndice C.2 se expone la aplicación de la metodología sobre un ejemplo de red real.

ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



4 Aislamiento del fallo y reposición del suministro

En este capítulo se describe la segunda parte del procedimiento sistemático propuesto, orientado a la delimitación y aislamiento de la sección que contiene el fallo y la reposición del suministro, una vez se ha identificado el estado interrumpido de un circuito radial y a partir del conocimiento creado sobre la ubicación del fallo con toda la información disponible por el OSD.

En el primer apartado se propone ampliar la utilidad de las consultas sobre el estado de alimentación de los clientes a una primera fase de aislamiento del fallo, sirviendo para identificar inequívocamente el DP que ha actuado despejando la falta, y por tanto delimitando el alcance de la interrupción.

En el segundo apartado se introduce el concepto de estado FDISR del circuito, determinado por el conocimiento que el operador tiene sobre la ubicación del fallo y el estado de los dispositivos de maniobra. Adicionalmente se presentan las medidas sobre un estado que permiten evaluar la extensión de la interrupción y la duración estimada hasta la restitución del estado normal, y la clasificación de secuencia de actuaciones de maniobra.

El tercer apartado desarrolla el procedimiento propuesto para la selección de



actuaciones de maniobra, guiado por la reducción esperada en un determinado índice de impacto de la interrupción sobre los suministros afectados. Las secuencias de maniobras consideradas como candidatas para su selección seguirán una serie de reglas heurísticas simples que, evitando planteamientos combinatoriales, consiguen resultados eficientes con bajos tiempos de computación.

En el cuarto apartado se expone la implementación algebraica del procedimiento haciendo uso del planteamiento matemático presentado en el capítulo 2 para un circuito MT radial. Para ilustrar el potencial de este trabajo como una herramienta útil en la gestión de interrupciones, se presenta en el apéndice B un ejemplo de la metodología propuesta sobre una red simple y en el apéndice C sobre una red real.

Finalmente, en el apartado quinto se exponen una serie de variaciones sobre la metodología presentada, que extienden las consideraciones realizadas previamente sobre la aplicación de restricciones técnicas, las configuraciones topológicas del circuito, así como sobre los criterios de selección de secuencias de actuación de maniobras.

4.1 Identificación del dispositivo de protección abierto

Cuando tras la aplicación del procedimiento descrito en el apartado 3.3 se identifica el estado de alimentación interrumpido de un circuito, los conjuntos \mathcal{F}_Σ y \mathcal{U} contienen el conocimiento creado sobre la actuación de los DP. Así, el conjunto $\mathcal{F}_\Sigma \setminus \mathcal{U}$ contiene cada DP que podría haber actuado en el despeje de la falta y por tanto causado la interrupción. Este conjunto puede contener más de un elemento cuando la información obtenida para determinar el estado interrumpido es insuficiente para determinar inequívocamente el DP que ha actuado.

Antes de comenzar las tareas de aislamiento y reposición del suministro mediante secuencias de maniobra, la consulta a clientes sobre su estado de alimentación podría ofrecer información útil para identificar el DP que ha actuado. La información adicional conseguida permitiría crear un mayor conocimiento sobre la extensión de la interrupción y el conjunto de nudos sospechosos, de una forma



más rápida incluso pudiendo ser automatizada, a un menor coste que mediante la realización de maniobras.

Cuando en un circuito en estado interrumpido se confirma que un determinado CD mantiene su alimentación, se puede concluir que cada DP ubicado en el camino troncal de este CD debe estar cerrado. Análoga conclusión se alcanza cuando se conoce que la alimentación de un CD está interrumpida, ya que en tal caso el DP que con su apertura ha despejado la falta debe encontrarse en el camino troncal del CD. Cuando la adquisición de esta información adicional descarta que un DP l en $\mathcal{F}_\Sigma \setminus \mathcal{U}$ pudiese haber actuado, todos los nudos que hubiesen provocado su actuación, $[C]_{lx}$, pueden eliminarse del conjunto de nudos sospechosos.

En un determinado instante tras la determinación del estado de alimentación interrumpido de un circuito, denotado por el índice k , el conjunto de nudos sospechosos es $\mathcal{F}(k)$. Sea l el índice de un CD del que se desconoce el estado de alimentación en un instante $k - 1$, se define $\mathcal{F}(k, l|OFF) \subset \mathcal{F}(k - 1)$ como el conjunto de nudos sospechosos que podrá concluirse en un instante posterior, si al consultar el estado de su alimentación a los clientes alimentados por el CD l , la respuesta es que permanecen interrumpidos. En caso de que la respuesta sea que se mantiene su alimentación, el conjunto de nudos sospechosos en k será el subconjunto $\mathcal{F}(k, l|ON) \subset \mathcal{F}(k - 1)$. Ambos conjuntos complementarios, $\mathcal{F}(k, l|OFF) \cup \mathcal{F}(k, l|ON) = \mathcal{F}(k - 1)$, contienen el conocimiento previo además del creado con la información del estado de alimentación del CD tras su consulta.

El conjunto $\mathcal{F}(k, l|OFF)$ puede obtenerse a partir de los nudos de $\mathcal{F}(k - 1)$ que provocan la actuación de cualquier DP que interrumpa la alimentación de l , que como se describió en el apartado 3.2.1 puede determinarse algebraicamente como:

$$\mathcal{F}(k, l|OFF) = \mathcal{F}(k - 1) \circ ([S^t \cdot C]_{lx})^t \quad (4.1)$$

El estado de alimentación esperado del CD l sigue una distribución de probabilidad dicotómica o Bernoulli, $Be(p_l)$, donde p_l es la probabilidad de que el CD l tenga su alimentación interrumpida que, empleando las tasa de fallos de los



elementos de red puede formularse como,

$$p_l = \frac{F(k,l|OFF)^t \cdot r}{F(k-1)^t \cdot r} \quad (4.2)$$

En el instante k interesará consultar a los clientes del CD l para el cual conocer su estado de alimentación tenga mayor probabilidad de ofrecer información útil para reducir el conjunto de nudos sospechosos ([70]). Esta condición coincide con el CD para el que la probabilidad de que permanecer alimentado y la probabilidad del caso alternativo de estar interrumpido, sean más próximas a $\frac{1}{2}$. Esto es equivalente a que l presente el mayor valor positivo del producto de ambas probabilidades complementarias:

$$(F(k,l|OFF)^t \cdot r) \cdot (F(k,l|ON)^t \cdot r) \quad (4.3)$$

El vector (4.3) tendrá valor nulo en los términos correspondientes a los CD para los que ya se conozca su estado de alimentación o para los que consultarlos no aporte información útil. Conocer el estado de la continuidad de un CD no aporta información útil cuando está ubicado aguas abajo de todos los DP sospechosos de haber actuado.

Sustituyendo (4.1) en (4.3) se obtiene:

$$L \circ [(S^t \cdot C) \cdot \hat{r}] \circ [(N^t \cdot \hat{r}) \cdot N - (S^t \cdot C) \cdot \hat{r}] \quad (4.4)$$

donde $\hat{r} = r \circ F(k-1)$.

En la Figura (4.1) se ilustra el procedimiento que parte del instante en el que se determina el estado interrumpido, $k=0$, hasta su finalización cuando no es posible extraer más conocimiento del estado de alimentación de los clientes. En el instante inicial en el que queda identificado el estado de alimentación, $k=0$, se tiene que $\mathcal{F}(0) = \mathcal{F}_\Sigma$, calculado según la expresión (3.7).



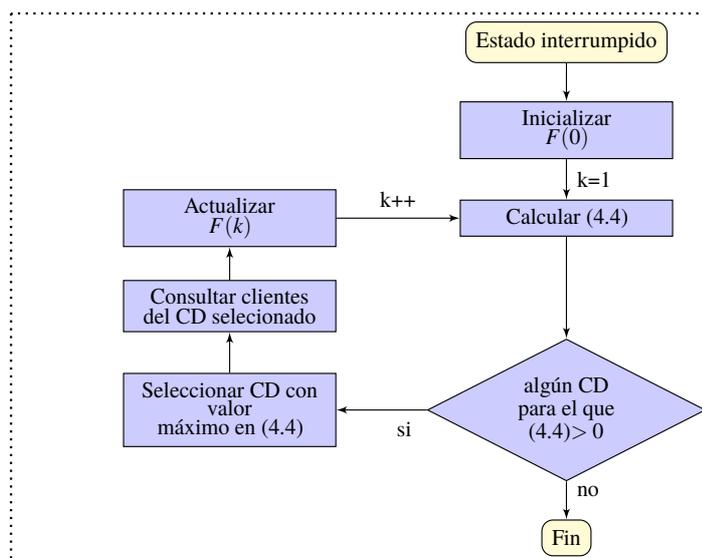


Figura 4.1 Procedimiento de selección de CD para consultar a clientes.

En cada iteración, para el instante k , se seleccionará para consultar a sus clientes, cualquier CD correspondiente a los términos que presenten en (4.4) un valor positivo máximo. Una vez consultado el estado de alimentación a los clientes alimentados por el CD seleccionado, se actualiza según el caso, $\mathcal{F}(k) = \mathcal{F}(k, l|OFF)$ o $\mathcal{F}(k) = \mathcal{F}(k, l|ON) = \mathcal{F}(k-1) \setminus \mathcal{F}(k, l|OFF)$. Cuando la expresión (4.4) sea un vector vacío, seguir consultando a clientes sobre su estado de alimentación no ofrece más información útil y por tanto se finaliza este procedimiento.

En el apartado 3.3.4 se presenta un ejemplo en el que el procedimiento de identificación del estado de alimentación se inicia por la recepción de señalización. En este ejemplo, cuando se concluye la existencia de una interrupción siempre queda identificado el DP que ha actuado.

Para ilustrar el procedimiento presentado en éste apartado se considera que en este circuito este ejemplo el DP 4 no tiene la capacidad de reconexión automática, o la ha perdido temporalmente. Con esta consideración, en la Tabla 4.1 se muestra el resultado del procedimiento de identificación del estado de alimentación para todas las situaciones de falta, en la misma estructura en que se presentó en la Tabla 3.3.

Según el procedimiento descrito en el apartado 3.3.1, cuando la señalización se



Tabla 4.1 Estado de alimentación identificado y conjunto de nudos sospechosos ante la recepción de señalización. Caso ejemplo modificado.

Π	Δ_d	Δ_u	(3.3)	SAFRA	SADRA	(3.4)	CD consultados (respuesta)	Estado alimentación	\mathcal{F}_Σ
1		6	Si	Si	Si	-	-	Interrumpido	2,3,4,9,10,11,12,15,16,17,18,19
				No	No	-	-	Normal	-
				No	-	No	-	Normal	-
-	6	-	No	No	-	-	-	Interrumpido	7,8,23,24,25
-	-	6	No	No	-	-	-	Interrumpido	5,13,14,20,21,22

limita a $\Delta_d = 6$ o a $\Delta_u = 6$, se concluye la existencia del estado interrumpido ($k = 0$) ya que en ambos casos no se satisface (3.3). En el primer caso, la interrupción del suministro puede deberse a la actuación de los DP 4 o 23, y en el segundo a los DP 4 o 12. En la cuarta columna de la Tabla 4.2 se muestran los resultados para $k = 1$ en la reducción del conjunto de nudos sospechosos, en cada caso y atendiendo a la respuesta de los clientes alimentados desde el CD seleccionado según (4.1).

Tabla 4.2 Reducción del SNS mediante consulta a clientes.

Π	Δ_d	Δ_u	$\mathcal{F}(0)$	CD seleccionado (respuesta de clientes)	$\mathcal{F}(1)$
-	6	-	7,8,23,24,25	22 (off)	7,8,23
				22 (on)	24,25
-	-	6	5,13,14,20,21,22	22 (off)	5,20,21,22
				22 (on)	13,14

4.2 Estado FDISR. Conceptos preliminares

Para simplificar la exposición, en lo sucesivo se extiende la definición de dispositivo de seccionamiento a cualquiera dispositivo que permita la interrupción del suministro aguas abajo de su ubicación. Se consideran bajo esta capacidad, los seccionadores a los que se puede modificar su estado, abierto o cerrado, y el dispositivo de protección que ha actuado en el despeje de la falta inicial. Esta protección puede cerrarse en ausencia de tensión bajo la decisión del operador, y en caso de energización del fallo volvería a actuar abriéndose.



4.2.1 Caracterización del estado FDISR

En un determinado instante k de la etapa de aislamiento del fallo y reposición del suministro, un circuito mantiene una configuración topológica definida por el conjunto $\mathcal{O}(k)$ de los DS que permanecen en estado abierto. En ese instante, el conocimiento sobre la ubicación del fallo se extiende al SNS, $\mathcal{F}(k)$, que como se definió en el apartado 3.3.3, es el conjunto de elementos del circuito que contiene al que ha provocado la falta. Estos dos conjuntos, con sus respectivos vectores asociados $F(k)$ y $O(k)$, determinan el estado FDISR $x(k) = \{F(k), O(k)\}$.

En el instante k , la delimitación conseguida de la sección que contiene el fallo o SNS, está recogida en $\mathcal{F}(k)$. Por otro lado, el aislamiento de la sección comprometida y las reconfiguraciones que logran la reposición del suministro quedan definidas por el estado de los DS almacenados en $\mathcal{O}(k)$.

Tomando como instante inicial, $k = 0$, el momento en que se conoce qué DP ha actuado en el despeje de la falta, se determina $F(0)$ según (3.7), empleando todo el conocimiento obtenido por el OSD hasta el momento, a partir de la señalización, reclamaciones de clientes y consultas realizadas sobre el estado de alimentación. El conjunto $O(0)$ contendrá todos los seccionadores abiertos en la configuración de operación radial del circuito, además del dispositivo de protección que ha actuado en el despeje de la falta.

Para un estado $x(k)$ conocido, pueden asociarse varias medidas $y(k) = h(x(k))$ entre las cuales definiremos a continuación: $t_R(k)$, $q(k)$ y $GII(k)$.

La medida $t_R(k)$ (time to resolve) es el tiempo estimado que se empleará en localizar y posteriormente reparar el fallo cuando las tareas requeridas para conseguirlo ([71]) comienzan en el instante k . Esto es, el tiempo estimado hasta la restitución del estado normal, el cual depende principalmente de:

- La extensión y características de la sección de red que se requiere inspeccionar (tramos de línea aéreas o subterráneas).



- El tipo de control sobre los dispositivos de maniobra (operados de forma remota o local, restricciones al acceso, etc.).
- La disponibilidad de recursos (operarios de campo) dedicados a la localización y la estrategia desarrollada.
- El tipo de elemento que requiera finalmente ser reparado.
- Otros factores (meteorología, limitaciones en los desplazamientos, situaciones excepcionales o de fuerza mayor, etc.)

De esta forma, $t_R(k)$ será función de los elementos contenidos en el SNS, $\mathcal{F}(k)$, así como de la parametrización de los tiempos característicos de las tareas de localización y reparación. Además, se deben considerar los tiempos de desplazamiento requeridos para alcanzar la ubicación del dispositivo que requiera ser maniobrado manualmente, que serán dependientes de la disponibilidad de los recursos dedicados y las restricciones implicadas, entre otros factores.

La medida $t_R(k)$ se obtendrá como un valor esperado empleando las tasas de fallo que modelan la probabilidad de que el fallo finalmente se encuentre en un determinado elemento de $\mathcal{F}(k)$. Disponer de un procedimiento adecuado de $t_R(k)$ sirve adicionalmente como una referencia con la que informar a los clientes sobre el tiempo estimado para reponer su suministro.

La medida $q(k)$ cuantifica el alcance o extensión de la interrupción (extent of outage) que puede considerar cualquier característica asociada a los CD interrumpidos como por ejemplo, la potencia interrumpida o el número de clientes afectados. La continuidad de suministro de cada CD está determinada por el estado de los dispositivos de seccionamiento, por lo que $q(k)$ es función de $O(k)$ y de la característica que se escoja para cuantificar el mercado interrumpido. Esta medida puede considerar una ponderación diferenciada a los suministros críticos cuya reposición es prioritaria ([46, 72]).

La tercera medida propuesta es el índice $GII(k)$ es el impacto generalizado de la interrupción (generalized interruption impact), que cuantifica el impacto de



la interrupción sobre los suministros a través del producto de las dos medidas anteriores:

$$GII(k) = q(k) \cdot t_R(k) \quad (4.5)$$

Cuando $q(k)$ cuantifica la potencia demandada por los suministros interrumpidos, $GII(k)$ será equivalente a la energía no servida. En caso de que $q(k)$ recoja el número de clientes afectados por la interrupción, $GII(k)$ resultará proporcional al numerador del índice SAIDI ([73]).

4.2.2 Secuencia de maniobras

Se define como secuencia de maniobras (ST - switching task) a las actuaciones sobre los dispositivos de seccionamiento de un circuito defectuoso que, siendo coordinadas por el OSD, le sirven para conseguir información adicional sobre la ubicación del fallo o posibilitar la reposición del suministro desde la cabecera del circuito o desde circuitos adyacentes de respaldo. Una vez finalizadas estas actuaciones el circuito queda reconfigurado, habiendo sido identificada y aislada la sección que contiene el fallo, sobre la que se realizarán posteriormente las tareas de localización y reparación del fallo. Los suministros que permanezcan interrumpidos en esta configuración modificada, permanecerán sin alimentación hasta que se finalice la reparación y se restituya el estado de operación normal.

Una ST implica la operación de cambio de estado (abierto o cerrado) de uno o varios dispositivos de seccionamiento ([48]) así como las acciones coordinadas por el OSD que se requieran para asegurar que la maniobra se realiza en ausencia de tensión y en cumplimiento de los procedimientos operativos. Cuando un DS se encuentre en tensión, previamente a su maniobra, se requiere interrumpir la fuente que lo energiza. Por ejemplo, en el caso del cierre de un DS abierto que aisle a una sección energizada de otra desenergizada, se requerirá que el interruptor automático en la cabecera del circuito que energiza la sección se abra primero, de modo que la maniobra se opere en ausencia de tensión. Una vez operado el DS, se cierra nuevamente el interruptor de cabecera para devolver el suministro



a la sección resultante de la reconfiguración realizada. Sin embargo, para una presentación más compacta, en adelante la referencia a una ST se limitará a la de los DS implicados, omitiéndose las acciones adicionales requeridas por el OSD, si bien estas son consideradas en la duración prevista de la ST.

Una ST denotada por $m = \{o, c\}$ implica, primero, la apertura del DS o y posteriormente el cierre del DS c . Una ST simple que conlleve la apertura del DS o puede denotarse como $m = \{o, -\}$, y como $m = \{-, c\}$ en el caso análogo para una maniobra simple de cierre del DS c .

Considerando la definición inicial, la realización de una ST m en un instante $k - 1$, supone la transición al estado posterior $x(k)$ con resultado tal que $t_R(k) < t_R(k - 1)$ o $q(k) < q(k - 1)$, lo que implica en cualquier caso que $GII(k) < GII(k - 1)$. La duración estimada de m se denotará por $d(m)$. Antes de realizar una ST m en el instante $k - 1$, interesará prever el estado $x(k, m)$ que se alcanzará y la duración prevista de las maniobras implicadas, $d(m)$. Las medidas sobre este estado alcanzado, $t_R(k, m)$ y $q(k, m)$ servirán para determinar la valoración del impacto esperado, $GII(k, m)$, por la realización de la ST.

Para apoyar la descripción que sigue, se introduce el concepto de sección de red, o simplemente sección, que definiremos como un conjunto de elementos conexos del circuito, delimitados por dispositivos de seccionamiento abiertos. Todos las secciones de un circuito son disjuntas excepto por nudos de $O(k)$. En un circuito defectuoso, pueden destacarse como relevantes tres tipos de secciones ([74]):

- Sección del fallo. Es la sección que contiene el elemento que ha fallado. Su energización implica la aparición de una falta.
- Sección de cabecera. Es la sección que tiene en su raíz la cabecera del circuito desde la que se energiza.
- Sección de cola. Esta sección ubicada aguas abajo de la sección del fallo está aislada de la cabecera del circuito por lo que solo puede ser energizada desde circuitos adyacentes de respaldo mediante el cierre de un DS frontera.



En la Figura 4.2 se muestra un circuito de ejemplo en estado interrumpido, en el que las cargas asociadas a cada sección de línea no están explícitamente representadas. En este circuito el SNS se extiende a la sección resaltada por lo que el DS s2 ha sido abierto para lograr la reposición de la sección de cabecera s1-s2 (entre el DS s1 y el DS s2). En dicha situación la sección s2-s5 será la sección del fallo. Si se abriese el DS s4, la sección del fallo se reduciría a s2-s4, y s4-s5 sería una sección de cola que podría ser repuesta cerrando el DS frontera s5 desde un circuito adyacente de respaldo BF (backup feeder).

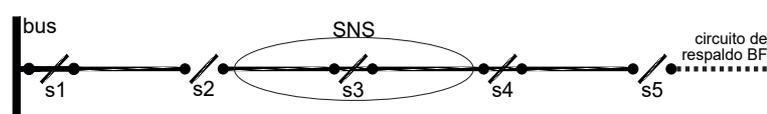


Figura 4.2 Ejemplo ilustrativo de las secciones de un circuito.

Se presenta la siguiente clasificación de las ST, atendiendo a la certeza sobre el estado conseguido tras su realización y su afectación en las medidas.

ST determinista (DST)

Una ST determinista (DST - Deterministic switching task), consigue la reposición del servicio de suministros al conectar la sección desenergizada desde la que se alimentan, con la cabecera del circuito o con un circuito adyacente de respaldo. Una DST consistirá al menos en una única maniobra, $m = \{-, c\}$ que debe realizarse en ausencia de tensión, interrumpiendo momentáneamente la fuente de alimentación a la que se va a conectar la sección. Esta reconfiguración exige el cumplimiento ([75]) de las restricciones técnicas (radialidad, capacidad, tensión de alimentación, etc.) así como la certeza de no energizar el elemento fallado. En el ejemplo de la Figura 4.2, cuando el DS s4 estuviese previamente abierto, la reposición de la sección s4-s5 se conseguiría con la DST $m = \{-, s5\}$.

Estas ST son deterministas puesto que el estado alcanzado puede ser previsto, de forma que $x(k) = x(k, m)$. La realización de una DST permite la reducción de la extensión de la interrupción, $q(k, m) \leq q(k - 1)$, pero no ofrece información



adicional para reducir el SNS, $t_R(k,m) = t_R(k-1)$.

ST probabilística (PST)

En una ST probabilística (PST - Probabilistic switching task) el estado alcanzado tras su realización no puede ser previsto, ya que depende de la ubicación del fallo. La realización de una PST siempre es útil para avanzar en la delimitación y el aislamiento de la sección que contiene el fallo. Dependiendo de la ubicación del fallo podría servir adicionalmente para conseguir la reposición del servicio de suministros y por tanto reducir el impacto de la interrupción.

Una PST consiste en, al menos, un par de maniobras $m = \{p,h\}$, donde p está contenido en la sección del fallo y h es el dispositivo de maniobra que aísla la sección de cabecera de la sección del fallo. La maniobra de apertura se realiza primero en una sección que está desenergizada, pero la segunda maniobra de cierre de h debe realizarse interrumpiendo la alimentación desde la cabecera del circuito. Desconociéndose la ubicación relativa del fallo respecto a p se restituye la alimentación desde la cabecera energizando la sección de cabecera resultado de la reconfiguración realizada. Si el fallo se encuentra en la sección de cabecera energizada aparecerá una falta y en caso de que el fallo se encuentra en la subsección aguas abajo de p no aparecerá.

Estos dos resultados alternativos, alcanzados tras la realización de la PST, dependiendo de dónde se encuentre el fallo, se denotarán respectivamente como resultado fallido (FO - faulty outcome) en caso de aparición del fallo; y resultado exitoso (\overline{FO}) en caso contrario. Por lo tanto, cuando m es una PST, no es posible determinar previamente el estado conseguido $x(k,m)$, sino que este será coincidente con uno de los dos estados alternativos posibles: $x(k,m|FO)$ o $x(k,m|\overline{FO})$.

Así, dependiendo del resultado obtenido tras la PST, el SNS queda reducido a unos de sus dos subconjuntos complementarios, lo que implica en cualquier caso que $t_R(k,m|FO) < t_R(k-1)$ y $t_R(k,m|\overline{FO}) < t_R(k-1)$. Si el resultado es exitoso (\overline{FO}), se consigue la reposición del servicio de los suministros en la sección de cabecera, aislada de la sección del fallo a través de p , por lo que $q(k,m|\overline{FO}) \leq q(k-1)$. En caso contrario, cuando el resultado es fallido (FO), la



extensión de la interrupción puede incrementarse tras la actuación del DP que despeja la falta, lo que implicará que $q(k, m|FO) \geq q(k-1)$.

En el caso del ejemplo de la Figura 4.2, asumiendo que el fallo se encuentra en la sección s3-s4, al realizar la PST $m = \{s3, s2\}$ el resultado tras la restitución de la alimentación será exitoso, obteniéndose la reducción del SNS y la reposición del suministro en la sección s2-s3. Si el fallo se encuentre en la sección s2-s3, el resultado será fallido, lo que proporciona también la reducción del SNS a expensas de interrumpir temporalmente el suministro de todo el circuito.

4.3 Metodología propuesta para la selección de una secuencia de maniobras

La metodología propuesta permite seleccionar en cada instante una ST entre un conjunto de secuencias candidatas determinadas según una serie de reglas heurísticas que aseguran tras su realización una reducción de la medida GII . El criterio de selección atiende a un, así definido, beneficio de la actuación que considera conjuntamente la reducción de GII conseguida y la duración estimada de la ST. A continuación se analiza cada bloque principal de la metodología propuesta ilustrado en la Figura 4.3.

4.3.1 Conjunto de secuencias de maniobras candidatas

Se define el conjunto $\mathcal{M}(k-1)$ que contiene cada ST considerada como candidata para su realización en la transición de $x(k-1)$ a $x(k)$. Considerar la combinación de todas las posibles actuaciones sobre DS en redes reales tendría costes computacionalmente inasumibles, por lo que se propone un enfoque heurístico. Para determinar las ST que se considerarán como candidatas, se definen cinco reglas de las cuales tres corresponden a DST y dos a PST. Estas reglas aseguran que la realización de cada ST propuesta para la transición de $x(k-1)$ a $x(k)$, consiga que $GII(k) < GII(k-1)$.



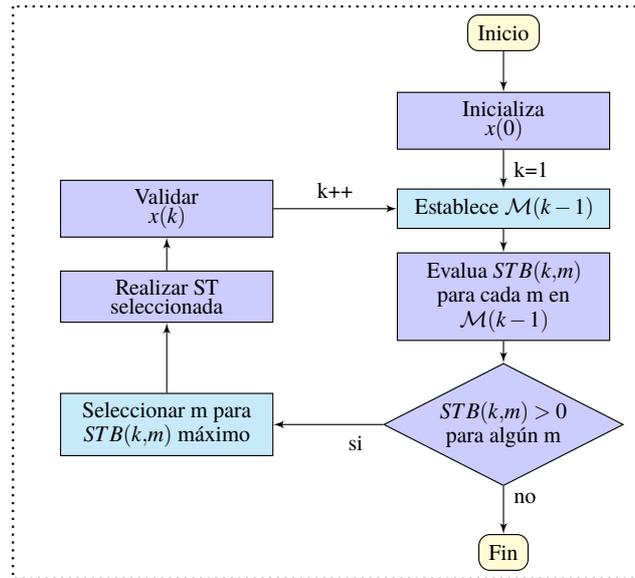


Figura 4.3 Metodología propuesta para la selección de actuaciones de maniobra.

Regla 1 - DST para la reposición desde la cabecera del circuito

Consiste en una DST $m = \{-, c\}$, como se describe en el apartado 4.2.2, que permite la energización de una sección aislada que no contiene el fallo desde la cabecera del circuito. Mediante el cierre de c se conecta la sección a energizar con la sección de cabecera, consiguiendo de hecho una sección de cabecera ampliada. Se asume la suficiente capacidad disponible desde la cabecera del circuito para atender a la nueva configuración conseguida, por lo que no sería necesario validar esta reconfiguración con las restricciones técnicas.

Regla 2 - DST para la reposición de un sección de cola

Consiste en una DST $m = \{-, c\}$ que energiza una sección de cola desde un circuito adyacente, o desde otra sección de cola ya energizada en el mismo circuito interrumpido. En el primer caso c será un DS frontera entre los dos circuitos, y en el segundo caso será el DS que aísla ambas secciones de cola. Como en el caso anterior, la sección que pasa de estar aislada a energizada tras esta maniobra no puede contener el fallo. En cualquier caso, se exige el cumplimiento de las restricciones técnicas en la nueva configuración alcanzada.



Regla 3 - DST para la reposición de una sección de cola precedido de una maniobra de aislamiento

Una ST según esta regla se denota como $m = \{o, c\}$, de forma que una primera maniobra de apertura de o sirve para crear una nueva sección de cola, ya sea aislándola de la sección del fallo o dividiendo una sección de cola previa en dos subsecciones. La segunda maniobra de cierre de c consigue la energización de la sección de cola bajo las mismas restricciones descritas en la regla anterior.

En el ejemplo de la Figura 4.2, la DST $\{s4, s5\}$ permite la reposición de la sección s4-s5 desde BF, primero abriendo el DS s4 para aislar esta sección del fallo y posteriormente cerrando el DS s5.

Regla 4 - PST con reposición de la sección de cabecera en caso de resultado fallido

Como se describió en el apartado 4.2.2, si se obtiene un resultado fallido (FO) tras la realización de una PST $m = \{p, h\}$, la extensión de la interrupción puede incrementarse respecto al estado anterior. En este caso, volver a abrir inmediatamente h permite restituir la configuración previa a la realización de la PST y por tanto que $q(k|FO) = q(k-1)$. Esta ST se denota como $m = (\{p, h\}, \{h, -\})$, de forma que la primera secuencia de maniobras correspondiente a la PST se realiza en cualquier caso, mientras que la segunda solo en caso de resultado fallido.

En el ejemplo de la Figura 4.2, si el fallo se encuentra en la sección s2-s3, tras la realización de la PST $m = \{s3, s2\}$ se obtendrá resultado fallido, quedando interrumpido el suministro de la sección s1-s2. Se requiere entonces volver a cerrar el DS s2 para reponer de nuevo el suministro de la sección s1-2 desde la cabecera del circuito.

Regla 5 - PST con reposición de la sección de cabecera y de la sección de cola en caso de resultado fallido

Si se obtiene un resultado fallido tras la realización de una PST $m = \{p, h\}$, se realizan dos maniobras adicionales. La primera es la misma que se ha descrito en



la regla anterior. La segunda maniobra es el cierre de t permitiendo la reposición de la sección de cola creada por la apertura de p , consiguiendo conjuntamente que $q(k|FO) < q(k-1)$. Obviamente se requiere el cumplimiento de las restricciones técnicas en la reposición de la sección de cola. Esta ST se denota como $m = (\{p,h\},\{h,t\})$, de forma que el primer par de maniobras correspondiente al PST se realiza en cualquier caso y la segunda solo si la PST concluye con resultado fallido, como se expuso en la regla anterior.

En el ejemplo de la Figura 4.2, cuando el fallo se encuentra en la sección s2-s3, tras realizar la PST $m = \{\{s3,s2\},\{s2,s5\}\}$ se consigue mantener la alimentación de la sección s1-s2 desde la cabecera del circuito y reponer el suministro de la sección s3-s5 desde BF .

4.3.2 Beneficio esperado de una secuencia de maniobras

Aunque la realización en $k-1$ de una ST m consiga reducir la medida GII , $GII(k,m) < GII(k-1)$, la duración de estas maniobras supondrá retrasar las actividades posteriores de localización y reparación del fallo. Para valorar el impacto de este retraso se define el índice de coste asociado a la realización de una ST, $STC(k,m)$ (switching task cost), como el producto de la duración prevista de la ST, $d(m)$ por la extensión de la interrupción en el estado precedente $q(k-1)$.

$$STC(k,m) = q(k-1) \cdot d(m) \quad (4.6)$$

Así, el beneficio esperado con la realización de una ST m en la transición desde el estado $k-1$ a k , $STB(k,m)$, se define como la reducción del impacto entre los estados sucesivos menos el coste asociado a la realización de la ST.

$$STB(k,m) = [GII(k-1) - GII(k,m)] - STC(k,m) \quad (4.7)$$

Cuando $STB(k,m)$ tiene un valor positivo, aun cuando se retrasa el comienzo de



la localización del fallo, el avance en el aislamiento del fallo ($t_R(k,m) < t_R(k-1)$) o la reposición del suministro conseguido ($q(k,m) < q(k-1)$), reduce el impacto de la interrupción respecto a la opción de comenzar inmediatamente las tareas de localización y reparación. En caso contrario, cuando $STB(k,m) \leq 0$, el coste de la ST no compensa la reducción del impacto conseguida.

En la Figura 4.4 se muestra la representación gráfica de los factores que determinan el beneficio de una ST, donde en el eje de abscisas se representa el tiempo transcurrido con origen en $k-1$ y en el eje de ordenadas se representa la extensión de la interrupción. El área cerrada por la línea gruesa corresponde al impacto en el estado previo $GII(k-1)$, que es el producto de $t_R(k-1)$ y $q(k-1)$. El área marrón corresponde al coste asociado a la ST m , $STC(k,m)$, cuando su duración prevista es $d(m)$. La realización de la ST m permite reducir la extensión de la interrupción a $q(k,m)$ y el tiempo previsto hasta la restitución del estado normal a $t_R(k,m)$, lo que supondrá reducir el impacto a $GII(k,m)$, representado por el área naranja. En el caso ilustrado, el beneficio esperado de la ST m , $STB(k,m)$ es positivo, y corresponde al área interior a $GII(k-1)$ que no está coloreada.

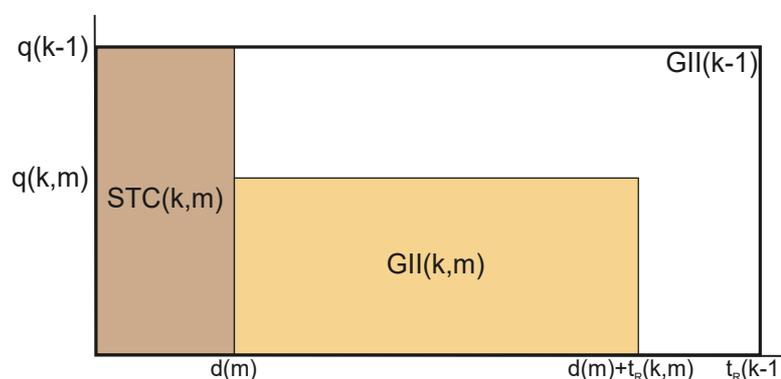


Figura 4.4 Representación del beneficio esperado de una ST.

Para una DST, el beneficio $STB(k,m)$ puede ser determinado según (4.7). En el caso de una PST, esta expresión servirá para determinar el beneficio asociado a cada uno de los dos estados alternativos posibles: $STB(k,m|\overline{FO})$ y $STB(k,m|FO)$, donde la duración prevista en cada caso también puede ser distinta, $d(m|\overline{FO}) \leq d(m|FO)$. Así, el beneficio asociado a la realización de una PST, $STB(k,m)$, será calculado



como un valor esperado

$$STB(k,m) = \phi \cdot STB(k,m|\overline{FO}) + (1 - \phi) \cdot STB(k,m|FO) \quad (4.8)$$

donde $\phi = \phi(k,m)$ es la probabilidad de que la realización de la PST tenga un resultado exitoso (\overline{FO}).

4.3.3 Criterio de selección de una secuencia de maniobras

En cada instante $k - 1$ se considerarán varias ST candidatas; cada una de las cuales conduce a un estado diferente donde probablemente surjan nuevas alternativas. Se podría plantear un criterio de selección de la secuencia de maniobras realmente óptima, basado en una búsqueda exhaustiva en un árbol de decisión, como los algoritmos de búsqueda en profundidad adoptados en juegos de ajedrez informáticos. Sin embargo, este tipo de implementaciones en redes reales, implicaría un esfuerzo computacional excesivo teniendo en cuenta la cantidad de opciones disponibles, la necesidad de validar las restricciones técnicas y la incertidumbre del estado resultante tras la realización de una PST.

Por ello, se propone considerar un criterio de selección simple, o selección en un solo paso, en el que para seleccionar una ST solo se atiende al beneficio esperado en la transición de estados que se consigue con su realización. Las secuencias de maniobra según la regla 5, definida en 4.3.1, se han introducido para mejorar el comportamiento de este criterio de selección un solo paso. Estas PST, que son la combinación de una PST de la regla 4, seguida de una DST de la regla 2, permiten evaluar conjuntamente el beneficio de ambas actuaciones cuando, la consideración de la DST como actuación candidata, solo es posible tras la realización previa de la PST.

La Figura 4.3 ilustra el procedimiento propuesto para seleccionar la ST, que en cada paso minimiza el impacto de la interrupción, comenzando en el estado inicial $x(0)$. En cada iteración se determina el conjunto $\mathcal{M}(k - 1)$ que contiene cada ST considerada como candidata para la transición de $k - 1$ a k , de acuerdo con las



reglas descritas en el apartado 4.3.1. El beneficio esperado de cada ST candidata, $STB(k,m)$, se evalúa como se describe en el apartado 4.3.2, seleccionándose aquella ST que presente un mayor valor positivo, si lo hay, de $STB(k,m)$. Tras realizar la ST escogida, se valida el estado $x(k)$ alcanzado que será la referencia de la siguiente iteración, atendiendo al resultado obtenido, exitoso o fallido, en caso de haber realizado una PST. Cuando alcanzado un determinado instante, no es posible obtener un valor positivo de $STB(k,m)$ se da por finalizada la tarea de aislamiento y reposición del suministro para comenzar la tarea de localización y reparación del fallo.

En el apartado 4.6.3 se presentará como variación al procedimiento de selección en un solo paso, un procedimiento de selección de ST mediante una búsqueda en profundidad del mayor beneficio esperado en un árbol de decisiones. Los resultados de ambos procedimientos sobre los ejemplos presentados en los apéndices B y C resultan ser muy parecidos en la mayoría de los casos. Más adelante en este capítulo, se propondrá un índice para comparar el desempeño de distintos procedimientos de selección de ST.

El procedimiento más exhaustivo ofrece mejores resultados en la reducción del impacto en el caso de circuitos en los que el cumplimiento de las restricciones técnicas requiere de reconfiguraciones complejas para que parte de su demanda pueda ser alimentado desde circuitos adyacentes. Estos casos, para los que se plantean un mayor número de combinaciones, son precisamente los que requerirían mayor esfuerzo computacional para ser resueltos de forma óptima. En cualquier caso, como es lógico, el procedimiento de selección en un solo paso requiere de tiempos de ejecución mucho más cortos que el procedimiento más exhaustivo.

4.4 Implementación algebraica

La formulación algebraica de aplicación al procedimiento descrito en el apartado 4.3 para un circuito radial se fundamenta las definiciones y estructuras matemáticas presentadas en el capítulo 2 sobre el grafo funcional del circuito. Como se adelantó en el apartado 4.2, se extiende la definición de dispositivo de seccionamiento,



conjunto \mathcal{W} , a cualquiera dispositivo que permita la interrupción del suministro aguas abajo de su ubicación. Se considera adicionalmente el subconjunto $\mathcal{Y} \subset \mathcal{W}$ de los DS que son frontera con otros circuitos adyacentes. El conjunto $\mathcal{O}(k) \subset \mathcal{W}$ corresponde a los DS que permanecen con estado abierto en el instante k .

4.4.1 Inicialización

En el instante en que comienza este procedimiento, $k = 0$, el OSD tiene la constancia de la existencia de un fallo permanente en un circuito MT. Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 4.1, ha obtenido información suficiente para identificar el DP f que ha actuado en el despeje de la falta y ha determinado el conjunto SNS codificado en $\mathcal{F}(0)$. Puesto que en $k = 0$ todos los dispositivos de seccionamiento frontera están abiertos ([76]), se tendrá que $\mathcal{O}(0) = \mathcal{Y} \cup \{n_f\}$.

4.4.2 Medidas asociadas al estado $x(k)$

La medida $t_R(k)$ requiere la cuantificación de la duración de las actividades en dos etapas, la localización del elemento fallado y su reparación. Puesto que en el instante k el conocimiento sobre la ubicación del fallo se extiende al conjunto $\mathcal{F}(k)$, el tiempo $t_R(k)$ se determinará como un valor esperado del tiempo de localización y reparación, considerando la probabilidad estadística de que el fallo se encuentre en cada uno de los elementos de $\mathcal{F}(k)$.

El primer análisis debe proporcionar el vector de tiempo de localización, $T_{loc}(k)$, cuyo componente i -ésimo contiene el tiempo necesario para localizar el fallo cuando este está ubicado en el nudo i . Suponemos que la localización del fallo requiere recorrer en profundidad el subgrafo que forman los elementos en $\mathcal{F}(k)$, así como inspeccionar la existencia del fallo en cada elemento alcanzado. Esta estrategia puede implementarse mediante técnicas convencionales de inspección de grafos o, como se propone a continuación, mediante el planteamiento algebraico propuesto.

Para determinar $[T_{loc}(k)]_i$ se requiere conocer qué elementos ha sido necesario



inspeccionar antes de llegar a encontrar el fallo en i . Esta información se encuentra en la matriz binaria $FS(k)$, calculada según se describe en el apéndice A.2.2 a partir de $\mathcal{F}(k)$, de forma que $[FS]_{ij} = 1$ si para llegar a inspeccionar i se ha inspeccionado previamente j . Siendo T_{search} (tiempo de inspección) un vector que en su término i -ésimo contiene el parámetro de tiempo necesario para recorrer el elemento del circuito correspondiente a i en la búsqueda del fallo, el término i -ésimo del producto $FS \cdot T_{search}$ es el tiempo dedicado a la inspección de elementos para terminar encontrando el fallo en i .

La búsqueda del fallo supone el recorrido de operarios a lo largo del trazado de la red, incrementando con su avance la distancia para volver atrás en caso de agotar un camino en profundidad. Por esto, en las definiciones presentadas en el apéndice A.2.2 se ha considerado priorizar entre caminos alternativos, aquellos que presenten una menor longitud del trazado de línea hasta el nudo hoja más lejano.

Cuando en el recorrido se agota un camino en profundidad sin encontrar el fallo, habrá que volver aguas arriba hasta el siguiente elemento en la secuencia de búsqueda. Asumimos que para realizar estos desplazamientos no se requiere seguir el trazado del circuito, para lo que se dispone como parámetro de la matriz T_{travel} (tiempo de desplazamiento), que contiene en su término ij el tiempo requerido para desplazarse de i a j . La matriz binaria $BS(k)$, calculada según se describe en el apéndice A.2.2 a partir de $\mathcal{F}(k)$, cumple que $[BS]_{ij} = 1$ cuando el nudo j es el siguiente nudo a inspeccionar tras el nudo hoja i , de forma que $(FS - I) \cdot (BS \circ T_{travel}) \cdot N$, contiene en su término i -ésimo el tiempo dedicado en realizar los desplazamientos de vuelta para terminar encontrando el fallo en i .

Así, a partir de la suma de ambos parámetros de tiempos, de inspección y desplazamientos, se determina que:

$$T_{loc} = FS \cdot T_{search} + (FS - I) \cdot (BS \circ T_{travel}) \cdot N \quad (4.9)$$

Para caracterizar la segunda etapa, correspondiente a la reparación del fallo, se utiliza el vector T_{repair} (tiempo de reparación), que contiene los parámetros de



tiempos de reparación esperado de cada elemento. A partir de ambos vectores y de la tasa de fallos estimada, r , el tiempo $t_R(k)$ puede obtenerse como:

$$t_R(k) = \frac{r^t \cdot (T_{loc}(k) + F(k) \circ T_{repair})}{r^t \cdot F(k)} \quad (4.10)$$

Como se describió en el apartado 4.2.1, la medida $q(k)$ cuantifica la extensión de la interrupción de los suministros desenergizados en el instante k . Para conseguir esta medida, se define el vector binario $B(k)$ que codifica los nudos que permanecen desenergizados en el instante k . Si en k , todos los caminos desde un nudo i hasta la cabecera del circuito o hasta cualquier DS frontera cerrado, están interrumpidos por algún dispositivo abierto, entonces i permanece desenergizado y por tanto $[B(k)]_i = 1$.

Para determinar $B(k)$, que solo depende de $\mathcal{O}(k)$, se requiere obtener previamente la matriz binaria $R(k)$, donde $[R]_{ij} = 1$ cuando i es el elemento de $\mathcal{O}(k)$ inmediatamente aguas arriba de j . Algebraicamente, se cumple que $[R]_{ij} = 1$ cuando $[(\text{diag}(\mathcal{O}(k)) \cdot S)^2]_{ij} = 1$. De aquí se obtiene la expresión algebraica de $B(k)$:

$$B(k) = R^t(k) \cdot \overline{(R(k) \cdot Y)} \quad (4.11)$$

La medida $q(k)$ se determina como combinación lineal de este vector $B(k)$ y la característica asociadas a los suministros que se escoja para su cuantificación; por ejemplo $q(k) = (cust)^t \cdot B(k)$ para el caso en que se utilice el número de clientes afectados por la interrupción o $q(k) = (demand)^t \cdot B(k)$ cuando se requiera cuantificar la interrumpida en términos de la demanda.

4.4.3 Validación de restricciones técnicas

Normalmente las restricciones técnicas en la reconfiguración de redes contemplan la suficiencia de capacidad de potencia disponible en la fuente para alimentar



a la carga alimentada ([77]), saturaciones de los tramos y nivel de tensión en los puntos de alimentación ([38]). Adicionalmente pueden considerarse la incertidumbre en la variabilidad de la demanda prevista, característica dinámica de la GD conectada a estas secciones, criterios operativos de seguridad para configuraciones en isla ([36]), cold-load pickup ([37]), etc.

Cuando las fuentes alternativas desde las que se consigue reponer el suministro son circuitos adyacentes, la planificación ([78]) y operación prevista ([76]) de la red justifican razonablemente que el balance propuesto pueda relajarse del cumplimiento de las restricciones en capacidad de línea y tensiones ([53]).

En el procedimiento propuesto, asumimos la simplificación de limitar estas restricciones al cumplimiento de un balance de energía activa con un factor de potencia característico, entre la capacidad disponible en las fronteras con los circuitos adyacentes y la potencia demandada. En el apartado 4.6.2 se presentará como variación al procedimiento expuesto, una propuesta de implementación del cálculo de intensidades de línea y tensiones de suministro, para incorporar su validación técnica y reglamentaria en las restricciones técnicas asociadas a una ST.

Cuando la realización de una ST consigue la reposición de la alimentación de suministros previamente interrumpidos, esta secuencia incluye una maniobra de cierre de un dispositivo de seccionamiento que conecta una sección aislada con otra sección energizada o una fuente de alimentación con suficiente capacidad para atender la demanda conectada. Tras realizar una maniobra de cierre del DS c en la transición de $k - 1$ a k , la sección que en k contiene a c se define como sección extendida $\mathcal{J}(k, \{-, c\})$ asociada a la maniobra $\{-, c\}$.

Esta sección extendida es creada por la unión de dos secciones cuando c es el dispositivo que las separa, o resulta energizada desde un circuito adyacente cuando c es el DS frontera. De modo análogo, la sección extendida $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$ asociada al par de maniobras $\{o, c\}$ en la transición de $k - 1$ a k , es la sección que se crea al cerrar c , cuando previamente la apertura del DS o ha dividido una sección en dos.



Algebraicamente, puesto que c está contenida en la sección extendida que se crea con su cierre, un nudo i pertenece a $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$ si

$$\left[(S^{[c]} - I)^t \cdot (O(k-1) + I_{xo} - I_{xc}) \right]_i = 0 \quad (4.12)$$

donde $S^{[c]}$ es la matriz de sucesores del grafo funcional del circuito cuando su configuración radial se reorienta desde c . La obtención de esta matriz a partir de la matriz de sucesores, S , del circuito con la orientación original, se describe en el apéndice A.2.2.

Cuando una sección $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$ es una sección de cola, estará energizada solo si contiene un dispositivo de seccionamiento frontera en estado cerrado que conecte la sección con un circuito adyacente con suficiente capacidad para alimentar su demanda. Estas condiciones equivalen a que exista $s \in \mathcal{Y}$ para el que se cumplan las siguientes tres condiciones:

$$\begin{cases} [J(k, \{o, c\})]_s = 1 \\ [O(k-1) + I_{xo} - I_{xc}]_s = 0 \\ (p_N)^t \cdot J(k, \{o, c\}) \leq [p_Y]_s \end{cases} \quad (4.13)$$

La primera y la segunda expresión de (4.13) aseguran que s esté contenido en la sección extendida y su estado sea cerrado. La tercera expresión garantiza el cumplimiento del balance de potencia activa entre la demanda de la sección extendida y la capacidad disponible desde el circuito adyacente al que se conecta a través de s . El vector p_N contiene la potencia demandada por los suministros conectados en cada elemento y p_Y contiene la capacidad disponible a través de cada DS frontera desde el circuito adyacente con el que conecta. Para el caso de una maniobra simple $\{-, c\}$, las expresiones (4.12) y (4.13) deben modificarse suprimiendo los factores indexados en o .

Nótese que cuando c conecta dos secciones, una energizada y otra desenergizada, s corresponde al DS frontera que conecta a la sección energizada con un circuito adyacente, y desde la que se seguirá alimentando la nueva sección $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$



conseguida tras la maniobra. Cuando c es un DS frontera que al cerrarse energiza $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$, el cumplimiento de (4.13) se limita a la tercera expresión para $s = c$.

4.4.4 Detección de secuencias de maniobras candidatas

En el procedimiento ilustrado en la Figura 4.3, tras la inicialización o validación en cada instante de su estado asociado, se determinará el conjunto de las ST candidatas, $\mathcal{M}(k-1)$, que son consideradas para su selección. A continuación se describen los criterios algebraicos correspondientes a cada una de las reglas descritas en el apartado 4.3.1 para que resulten compatibles con el estado previo de los DS, aseguren la utilidad de la ST en la reducción de GII y, cuando se requiera, el cumplimiento de las restricciones técnicas. Cada ST m que en $k-1$ cumpla los siguientes criterios para cualquiera de las cinco reglas, será incluida como candidata en $\mathcal{M}(k-1)$.

Regla 1 [$m = \{-, c\}$]

Para cada DS c abierto, $[O(k-1)]_c = 1$, para el que no existe ningún otro DS abierto aguas arriba, $S_{xc}^t \cdot O(k-1) = 1$. La sección extendida, $\mathcal{J}(k, \{-, c\})$, que quedará energizada desde la cabecera del circuito, debe cumplir que:

- No contenga el fallo, $F^t(k-1) \cdot J(k, \{-, c\}) = 0$.
- No contenga ningún DS frontera abierto, para que quede asegurada la radiación de la configuración resultante, $(Y \circ \overline{O(k-1)})^t \cdot J(k, \{-, c\}) = 0$.

Regla 2 [$m = \{-, c\}$]

Para cada DS c abierto, $[O(k-1)]_c = 1$, para el que existe algún otro DS abierto aguas arriba, $S_{xc}^t \cdot O(k-1) > 1$. La sección extendida, $\mathcal{J}(k, \{-, c\})$, que quedará energizada desde un circuito adyacente, debe cumplir que:

- No contenga el fallo, $F^t(k-1) \cdot J(k, \{-, c\}) = 0$.



- Existe $s \in \mathcal{Y}$ para el que se satisface (4.13).

Regla 3 [$m = \{o, c\}$]

Para cada DS c abierto, $[O(k-1)]_c = 1$, para el que existe algún otro DS abierto aguas arriba, $S_{xc}^t \cdot O(k-1) > 1$, como en la regla anterior. Dado c , para cada DS o cerrado, $[O(k-1)]_o = 0$, contenido en la sección extendida $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$, lo que requiere que se cumpla $[J(k, \{o, c\})]_o = 1$. La sección extendida, $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$, que quedará energizada desde un circuito adyacente, debe cumplir que:

- No contenga el fallo, $F^t(k-1) \cdot J(k, \{o, c\}) = 0$.
- Existe $s \in \mathcal{Y}$ para el que se satisface (4.13).

Regla 4 [$m = (\{p, h\}, \{h, -\})$]

Para cada DS p cerrado, $[O(k-1)]_p = 0$, que contiene parcialmente a $\mathcal{F}(k-1)$ aguas abajo, lo que implica que $(N^t \cdot F(k-1)) > (S_{px} \cdot F(k-1)) > 0$. Donde h el DS abierto aguas arriba de p , que aísla la sección de cabecera de la sección del fallo, $[S_{xp} \circ O(k-1)]_h = 1$.

Regla 5 [$m = (\{p, h\}, \{h, t\})$]

Para cada par p y h según las condiciones de la Regla 4, para cada DS t abierto ubicado aguas abajo de p , $[S_{px}^t \circ O(k-1)]_t = 1$. Adicionalmente el cumplimiento de las restricciones técnicas exige que exista $s \in \mathcal{Y}$ que satisface (4.13) para la sección extendida $\mathcal{J}(k, \{p, t\})$.

4.4.5 Evaluación del beneficio esperado de una secuencia de maniobras

Siguiendo el procedimiento ilustrado en la Figura 4.3, para cada ST candidata en $\mathcal{M}(k-1)$, debe evaluarse el beneficio esperado $STB(k, m)$. En este apartado se describen las expresiones algebraicas para determinar el estado FDISR $x(k, m) =$



$\{F(k,m), O(k,m)\}$ que se alcanzaría tras la realización en $k - 1$ de una DST, y los dos estados alternativos, $x(k,m|\overline{FO})$ y $x(k,m|FO)$, en caso de una PST. El beneficio de cada ST, $STB(k,m)$, se calculará a partir de las medidas asociadas a estos estados.

Se omite una definición algebraica genérica para la estimación de la duración prevista de una ST, $d(m)$. Esta estimación requiere considerar la capacidad de control remoto de los dispositivos de seccionamiento ([43], [79]), número de equipos de operarios, recursos disponibles y restricciones en el desplazamiento, etc. Así, para el procedimiento descrito, la duración de las actuaciones es un dato externo que informa de los tiempos requeridos para que los equipos se desplacen hasta los dispositivos involucrados en la ST. A su vez, el proceso que determina estas duraciones, debe alimentarse de las actuaciones seleccionadas para considerar la nueva ubicación de los equipos de operarios. En los casos de ejemplo presentados en los apéndices B y C se han propuesto unas estrategias concretas de movilidad de los operarios para modelar la duración de las ST.

Para cada ST candidata en $\mathcal{M}(k - 1)$, dependiendo de si se trata de una DST o una PST, se calcula el beneficio esperado $STB(k,m)$, mediante los siguientes cálculos.

DST según reglas 1, 2 y 3

Para calcular el beneficio esperado, $STB(k,m)$, de una DST se necesita determinar el estado alcanzado tras su realización, $x(k,m)$. Como se describió en el apartado 4.2.2, una DST no permite reducir el SNS, por lo que $F(k,m) = F(k - 1)$. El conjunto $O(k,m)$ será, según la regla:

- Reglas 1 y 2: $O(k,m) = O(k - 1) - I_{xc}$.
- Regla 3: $O(k,m) = O(k - 1) + I_{xo} - I_{xc}$.

La medida $t_R(k,m)$ no requiere ser calculada ya que $t_R(k,m) = t_R(k - 1)$ por lo que solo se necesita determinar $q(k,m)$ a partir de $O(k,m)$ según se describió en el apartado 4.4.2. Para poder calcular $STB(k,m)$ según la expresión (4.7) solo será



necesario conocer $STC(k,m)$ que se determina según la expresión (4.6), con la medida conocida $q(k-1)$ y la estimación de la duraciones $d(m)$.

PST según reglas 4 y 5

Para una PST se requiere calcular el beneficio asociado a cada uno de los dos estados alternativos posibles, $STB(k,m|\overline{FO})$ y $STB(k,m|FO)$, para lo que se requiere determinar los dos estados previstos $x(k,m|\overline{FO})$ y $x(k,m|FO)$.

En cualquier caso para estas dos reglas se tiene que,

- $F(k,m|\overline{FO}) = S_{px}^t \circ F(k-1)$
- $F(k,m|FO) = F(k-1) - F(k,m|\overline{FO})$
- $O(k,m|\overline{FO}) = O(k-1) + I_{xp} - I_{xh}$.

y diferenciadamente,

- Regla 4: $O(k,m|FO) = O(k-1) + I_{xp}$
- Regla 5: $O(k,m|FO) = O(k-1) + I_{xp} - I_{xt}$

A partir de los respectivos conjuntos se evalúan las medidas $t_R(k,m|FO)$, $t_R(k,m|\overline{FO})$, $q(k,m|FO)$ y $q(k,m|\overline{FO})$. Conocidas las duraciones estimadas $d(m|\overline{FO})$ y $d(m|FO)$, se calculan $STC(k,m|FO)$ y $STC(k,m|\overline{FO})$ a partir de (4.6), y con estas, $STB(k,m|\overline{FO})$ y $STB(k,m|FO)$ según la expresión (4.7). Finalmente, el valor esperado $STB(k,m)$ se consigue con la expresión (4.8), donde $\phi = \phi(k,m)$ es la probabilidad de que el fallo se encuentre aguas abajo de p , que se obtiene como:

$$\phi(k,m) = \frac{r^t \cdot (S_{px}^t \circ F(k-1))}{r^t \cdot F(k-1)} \quad (4.14)$$



4.4.6 Selección de la actuación y validación del estado alcanzado

Una vez que se dispone del beneficio esperado de cada ST candidata, el procedimiento ilustrado en la Figura 4.3 continua cuando para algún ST $m \in \mathcal{M}(k-1)$ se tiene que $STB(k,m) > 0$. En este caso se selecciona y realiza aquella con un $STB(k,m)$ máximo. Una vez realizada la ST seleccionada, se requiere validar el estado $x(k)$ alcanzado con los conjuntos \mathcal{F} y \mathcal{O} de los estados previstos, atendiendo al resultado conseguido fallido o exitoso, en caso de haber realizado una PST. Cuando no se disponga de ninguna ST candidata, o para ninguna de las ST consideradas se consiga un valor esperado $STB(k,m)$ positivo, se da por finalizado el procedimiento a través de la salida inferior de la representación mostrada en la Figura 4.3.

En el apéndice B.2 se presenta sobre un ejemplo de red simple varios casos de aplicación de la metodología presentada. En el apéndice C.3 se extiende esta ilustración a otros dos casos sobre un ejemplo de red real.

4.5 Impacto total de una interrupción

En el estado inicial, $k = 0$, tras identificar el estado interrumpido del circuito, si se inicia inmediatamente la tarea de localización y reparación del fallo, el impacto previsto de la interrupción será $GII(0)$, que evalúa el producto de la extensión de la interrupción de todos los suministros afectados por el tiempo estimado hasta la restitución del estado normal.

Si alternativamente en $k = 0$, se realizan una serie de ST, cada una de ellas seleccionadas con un beneficio positivo en el instante en que se realizan, el impacto previsto en el estado previo al comienzo de la localización, será menor que $GII(0)$.

Se define como impacto total de una interrupción, resultado de una determinada sucesión de ST realizadas, a la suma de los costes de cada ST realizada más el impacto de la interrupción en el último instante en que finalizan las tareas FDISR y a partir de la cual comienza la tarea de localización y reparación del fallo.



En la Figura 4.5 se muestra una gráfica de evolución del índice GII, en un ejemplo donde se realizan dos ST etiquetadas 1 y 2, coincidentemente con el instante al que conducen. El eje de abscisas de esta gráfica corresponde al tiempo transcurrido desde el comienzo de la actividad de aislamiento en $k = 0$ hasta la reparación del fallo, y el eje de ordenadas representa la extensión de la interrupción.

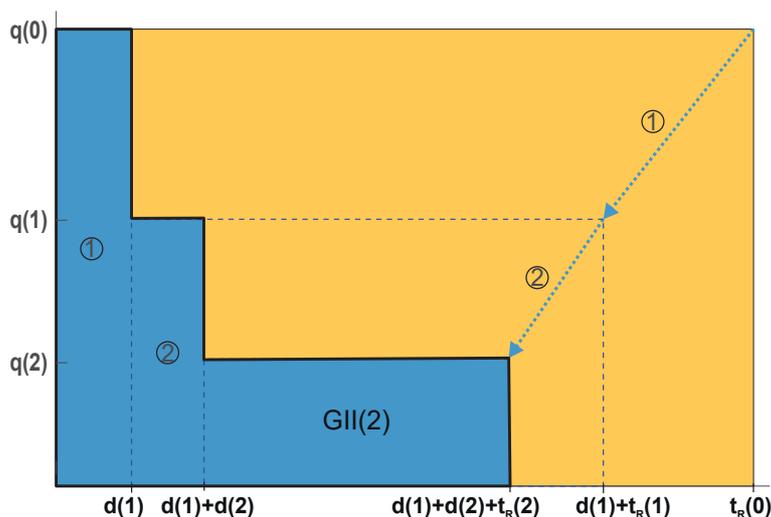


Figura 4.5 Ejemplo de gráfica GII.

Las flechas señalan el avance progresivo, en cada instante correspondiente a la etiqueta que le acompaña, del tiempo previsto hasta la finalización de la reparación y de la extensión de la interrupción. Por tanto, estas flechas apuntan a la esquina superior derecha de las áreas rectangulares limitadas por línea discontinua, que representan el valor de GII en cada estado desplazadas del origen en la suma de la duración de todas las ST previas.

Las etiquetas de ambas ST se repiten para indicar las áreas de sus respectivos costes asociados. El área azul representa el impacto total de la interrupción tras la realización de dos ST ilustradas, y por tanto el área naranja representa la reducción del impacto conseguido respecto de $GII(0)$.

El impacto total de una interrupción no puede conocerse hasta que se finaliza la última ST que se realizará antes de comenzar las tareas de localización y reparación



del fallo. El resultado obtenido dependerá de la estrategia seguida para plantear distintas alternativas, del criterio de selección de la ST a realizar en cada instante y de la ubicación del fallo.

Bajo la premisa de que el fallo se encuentre en un determinado elemento del SNS inicial, el OSD puede prever las sucesivas ST que se realizarán cuando se aplica un determinado procedimiento y por tanto el impacto total de la interrupción. Al desconocerse la ubicación exacta del fallo en el instante inicial, el OSD solo puede determinar el valor esperado del impacto total de la interrupción, considerando la probabilidad de fallo de cada elemento. Así, se define el impacto total esperado (o medio) de una interrupción, como la media de los impactos totales conseguidos cuando el fallo se encuentra en cada elemento del SNS inicial ponderada por la tasa de fallos de estos elementos.

El cálculo del impacto total esperado puede simplificarse considerando que el impacto total de la interrupción será el mismo en todos los casos correspondientes al fallo de elementos que no puedan ser aislados entre sí por un DS, es decir, que estén en la misma sección aislable. Se define el conjunto $\mathcal{W}(i)$ que contiene los nudos del SNS inicial para los que $i \in \mathcal{W}$ es el DS ubicado inmediatamente aguas arriba, y que por tanto forman parte de la misma sección aislable. Puede determinarse algebraicamente que $[W(i)]_j = 1$ cuando,

$$[S(\mathcal{W}, \mathcal{W}) \cdot (S)]_{ij} = 1 \quad (4.15)$$

El impacto total esperado de una interrupción, se puede calcular como el valor medio del impacto total conseguido en cada conjunto $\mathcal{W}(i)$, ponderado por la suma de las tasas de fallos de los elementos de cada conjunto contenidos en el SNS inicial, $r^f \cdot (W(i) \circ F(0))$.

Para el OSD, el impacto total esperado es un indicador de la importancia de la interrupción que debe gestionar y puede servirle para tomar decisiones movilizando recursos adicionales que permitan reducirlo, por ejemplo, coordinando a más equipos de operarios o disponiendo de grupos electrógenos.



El impacto total esperado representa adicionalmente una medida válida de comparación de distintos procedimientos de selección de actuaciones de maniobra a partir de un mismo estado inicial. En los ejemplos presentados en los apéndices B y C se comparan en cada caso descrito, los valores del impacto total obtenidos con el procedimiento de selección en un solo paso y otros procedimientos más exhaustivos, propuestos más adelante en los apartados 4.6.3 y 4.6.4. Adicionalmente, en el apéndice B.2, se emplea este índice medio para cuantificar el efecto de haber incluido la PST según la regla 5 en el conjunto de reglas heurísticas.

4.6 Consideraciones para la ampliación de la metodología presentada

En este apartado se presentan las variaciones requeridas en la metodología propuesta para modelar la existencia de bucles en un circuito e incorporar el criterio de ausencia de congestiones tras una reconfiguración topológica. Además, se describe la ampliación del procedimiento para considerar un criterio de selección de ST más exhaustivo del inicialmente planteado. Finalmente se presenta una propuesta para extender las reglas heurísticas que determinan las ST candidatas y consideraciones sobre la realización aplazada de actuaciones.

4.6.1 Circuito con bucles abiertos

En la descripción anterior se ha tenido en cuenta las reconfiguraciones necesarias para conseguir la reposición desde circuitos adyacentes. Ciertas reconfiguraciones permiten la reposición del suministro desde la misma cabecera del circuito a través de caminos alternativos que eviten la energización de la sección que contiene el fallo. En el estado de operación normal de un circuito, los DS que permanecen en estado abierto para conseguir la configuración radial, abriendo los bucles topológicos del circuito, se modelan en el grafo funcional como dos nudos correspondientes a ambos terminales del DS. Ambos dispositivos se incluyen en \mathcal{Y} para que el procedimiento los trate como un DS frontera con la diferencia de que en estos casos cuando se analiza la energización de una sección de cola,



puede obviarse la comprobación del cumplimiento de las restricciones técnicas. En la Figura 4.6 se muestra un ejemplo de circuito con un bucle abierto por el seccionador 5. En el grafo funcional correspondiente a este circuito, en la Figura 4.7, se observa que los nudos $5'$ y $5''$ corresponden a este seccionador abierto.

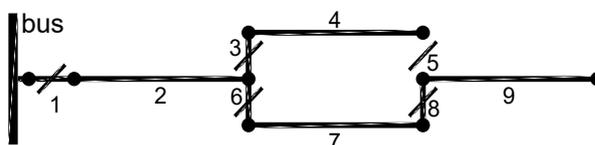


Figura 4.6 Representación unifilar de un circuito con bucle abierto.

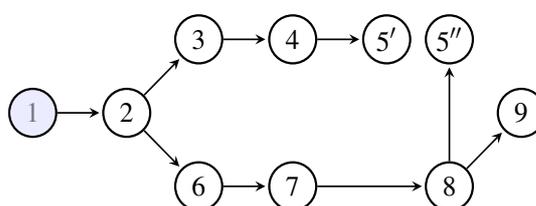


Figura 4.7 Grafo funcional del circuito ilustrado en la Figura 4.6 .

4.6.2 Ampliación de las restricciones técnicas al análisis de existencia de congestiones

En el apartado 4.4.3 se planteó que las restricciones técnicas exigibles a las reconfiguración asociadas a una ST se limitarían al cumplimiento de un balance de energía activa con un factor de potencia característico entre la capacidad disponible en las fronteras con los circuitos adyacentes y la demanda. Cuando las fuentes alternativas desde las que se consigue reponer el suministro son circuitos adyacentes, la planificación y operación prevista de la redes justifica razonablemente que el balance propuesto pueda relajarse del cumplimiento de las restricciones en capacidad de línea y tensiones. Sin embargo, puede considerarse necesario ampliar las restricciones técnicas exigibles a la ausencia de congestiones en la configuración modificada prevista en el periodo en que se mantenga este estado excepcional.

En este apartado, primero, se presenta una adaptación de un cálculo iterativo



aproximado de las magnitudes eléctricas de un circuito radial, en la que se emplea la matriz S y parametrización sobre el grafo funcional. Posteriormente, se definirá cómo obtener las estructuras matemáticas de un circuito resultado de la realización de una ST que conecta un circuito original sano con una sección aislada de otro circuito interrumpido, empleando para esto las estructuras de los circuitos originales involucrados.

De la aplicación de esta formulación se podrá verificar si en la reconfiguración obtenida tras realizar una ST que energiza una sección de cola desde un circuito adyacente, los valores de tensión en los nudos desde los que se alimentan los suministros están dentro de los límites reglamentarios y la saturación de los tramos de línea son aceptables.

Cálculo de tensiones e intensidades

Para un circuito radial definido por su grafo funcional se conoce la matriz de sucesores S , la tensión en la cabecera del circuito V_{bus} , la demanda activa prevista de los clientes alimentados desde cada CD p_L y los vectores r_Z y x_Z con la resistencia y reactancia de los tramos de línea.

De forma aproximada (aproximación de Kapp), considerando el circuito equivalente de una línea corta (inferior a 50 km), puede determinarse el vector $\Delta Volt$ que contiene en su término i -ésimo la caída de tensión entre el nudo i y su nudo padre en el grafo funcional como

$$\Delta Volt = \sqrt{3} \cdot Amp \cdot \cos \varphi \cdot (r_Z + x_Z \cdot \tan \varphi) \quad (4.16)$$

donde $\cos \varphi$ es el factor de potencia considerado constante para toda la demanda y Amp es el vector de las intensidades que transitan cada elemento. En los términos correspondientes a elementos que no sean líneas, esta caída de tensión será nula.

El término $[S \cdot p_L]_i$ es la demanda activa de todos los CD aguas abajo de i y que por tanto es transportada por el elemento correspondiente. Sea $Volt$ un vector de



tensiones, tal que $[Volt]_i$ es la tensión de i (correspondiente al extremo aguas arriba en caso de línea), puede determinarse la intensidad que transita i , $[Amp]_i$, como

$$[Amp]_i = \frac{[S \cdot p_L]_i}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot [Volt]_i}$$

con lo que el vector Amp , se obtiene del cociente término a término de dos vectores

$$Amp = (S \cdot p_L) \oslash (\sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot Volt) \quad (4.17)$$

A su vez, la tensión en cada nudo puede calcularse como la tensión en la cabecera del circuito, V_{bus} , menos la suma de las caídas de tensión en su camino troncal, exceptuando el propio nudo:

$$Volt = V_{bus} - (S - I)^t \cdot \Delta Volt \quad (4.18)$$

Para obtener los vectores Amp y $Volt$, se parte de $\Delta Volt$ como vector nulo y se calculan iterativamente las expresiones (4.18), (4.17) y (4.16) hasta que se consiga una suficiente convergencia entre iteraciones del vector $Volt$.

Validación de la topología modificada en la reposición desde circuitos vecinos

Sea un circuito radial A en estado interrumpido sobre el que se pretende analizar el par de maniobras $\{o, c\}$ en el instante $k - 1$. Si la sección extendida $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$ contiene a s , DS cerrado frontera con el circuito adyacente B , esta sección extendida quedará energizada desde la cabecera del circuito B . Nótese que puede darse el caso de que la maniobra de cierre se realice sobre el mismo DS frontera, pero en otros casos c será el DS que une una sección aislada con otra energizada previamente a través de s . En cualquier caso, para comprobar que en la configuración modificada las tensiones mantienen un valor adecuado y no existen saturaciones de



ningún tramo, se requiere inicialmente determinar el grafo funcional del circuito B ampliado a la sección $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$ y sus conjuntos asociados. Denotando este circuito ampliado como BJ , su matriz de sucesores puede determinarse como

$$S_{BJ} = \left(\begin{array}{c|c} S_B & [S_B]_{xg} \cdot N_J^t \\ \hline 0 & S_J \end{array} \right)$$

donde:

- S_B es la matriz de sucesores del grafo funcional del circuito B .
- S_J es la matriz resultado de extraer de $S_A^{[s]}$ las filas y columnas correspondientes a los nudos en $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$. La matriz $S_A^{[s]}$ es la matriz de sucesores del grafo funcional del circuito A cuando su configuración radial se reorienta desde s . El procedimiento para obtener $S_A^{[s]}$ a partir de la matriz de sucesores del circuito original A se describe en el apéndice A.2.2.
- El índice g del grafo funcional del circuito B , corresponde al DS que es frontera con el circuito A , dispositivo que en el grafo funcional de A corresponde al nudo s .
- N_J es un vector de unos, de tamaño igual al número de nudos en $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$.

Un vector genérico de los que codifican conjuntos del grafo funcional del circuito BJ se consigue como

$$X_{BJ} = \left(\begin{array}{c} X_B \\ \hline X_J \end{array} \right)$$

donde X_B es el vector correspondiente para el grafo funcional del circuito B .



El vector X_J se obtiene extrayendo de X_A , vector correspondiente para el grafo funcional del circuito A , las filas y columnas para los términos en $\mathcal{J}(k, \{o, c\})$.

Aplicando sobre este circuito BJ el cálculo de las intensidades de línea y las tensiones en CD descrito en el apartado 4.6.2, se determina el cumplimiento de las restricciones técnicas de la reconfiguración obtenida cuando se satisface conjuntamente que:

- Los valores de tensión en los nudos desde los que se alimentan los suministros $Volt \circ L_{BJ}$ están dentro de los límites reglamentarios.
- El nivel de saturación de los tramos de línea, como la relación entre las intensidades calculadas por los tramos, $Amp \circ Z_{BJ}$, y su capacidad máxima, es inferior al valor máximo aceptable en el periodo en que se mantenga la reconfiguración de los circuitos.

4.6.3 Selección de actuaciones en maniobra mediante búsqueda en profundidad

En el apartado 4.3.3 se ha propuesto que el procedimiento de selección de actuaciones de maniobra sobre el conjunto de las ST candidatas en un instante $k - 1$ considere únicamente el beneficio esperado en la transición que consigue su realización, de $x(k - 1)$ a $x(k)$. Esta simplificación de selección en un solo paso, permite obtener tiempos de computación muy reducidos frente a la mayor exigencia requerida por procedimientos de búsqueda exhaustivos.

La realización de una determinada ST condiciona las siguientes alternativas consideradas, en algunos casos reduciéndolas y en otros posibilitando nuevas ST que eran inviables anteriormente. Por otro lado, el desplazamiento de los equipos de operarios en la realización de una ST modifica la duración de las siguientes actuaciones consideradas y, por tanto, su beneficio. Además, la reconfiguración del circuito puede alterar las sucesivas actuaciones necesarias para conseguir la reposición del suministro en secciones sanas. Para compensar parcialmente las limitaciones de la selección de cada ST en un solo paso, se introdujo la regla 5 en el apartado 4.3.1 que permite considerar la reposición de la sección de cola que



genera una PST en caso de resultado fallido.

En esta sección se presenta como variación al procedimiento expuesto en el apartado 4.3.3, un criterio de selección de una ST en un instante $k - 1$, teniendo en cuenta el beneficio esperado, no solo de la propia ST seleccionada, sino de las sucesivas ST que pudiesen resultar seleccionadas posteriormente.

Para implementar este procedimiento de selección de ST mediante una búsqueda en profundidad del mayor beneficio esperado se requiere construir un árbol de decisiones. En este árbol de decisiones en el que cada nudo corresponde a un estado FDISR o a una ST que consigue la transición entre estados, se construirá haciendo uso del mismo planteamiento matemático desarrollado en este capítulo. Cada nudo correspondiente a un estado tendrá tantos hijos como ST candidatas se consideren y cada nudo correspondiente a una ST tendrá tantos hijos como distintos estados puedan resultar de su realización.

El nudo raíz de árbol de decisión corresponde al estado $k - 1$, instante en el que se pretende seleccionar la siguiente ST a realizar, del que se conocen sus conjuntos $\mathcal{F}(k - 1)$ y $\mathcal{O}(k - 1)$. El nudo raíz tendrá tantos hijos como ST candidatas se determinen mediante las reglas definidas en 4.4.4 a excepción de las PST según la regla 5, ya que su propósito será resuelto por el procedimiento de búsqueda en profundidad. A su vez, cada uno de los nudos ST tendrán tantos hijos como estados posibles puedan resultar de la realización de la ST, esto es, dos para las PST y uno para las DST. Haciendo uso de los cálculos descritos en 4.4.5, para estos nuevos nudos se determinan \mathcal{F} y \mathcal{O} y el beneficio STB asociado, resultado de la realización de la ST de su nudo padre en el estado precedente determinado por su nudo abuelo. Adicionalmente, cada nudo correspondiente a un estado estará caracterizado por la probabilidad de ser alcanzado tras la realización de la ST que le precede, que será la unidad en caso de una DST y ϕ o $(1 - \phi)$, respectivamente, para el resultado exitoso o fallido en caso de una PST.

El procedimiento se repite iterativamente hasta que se agoten las ST candidatas o hasta que se alcance el nivel de profundidad máximo al que se decida limitar el análisis para contener el esfuerzo computacional. En cualquier caso, un nudo del árbol de decisiones corresponde a un estado si su profundidad es impar o a una



ST si su profundidad es par. Así, la altura del árbol será $1 + 2 \cdot k_{max}$ donde k_{max} corresponde al estado más avanzado en el árbol de decisiones.

En la Figura 4.9 se muestra el árbol de decisiones correspondiente al ejemplo ilustrativo expuesto en el apartado 4.2.2, cuyo diagrama unifilar se ilustra de nuevo en la Figura 4.8. En este ejemplo, el árbol de avance se extiende hasta $k_{max} = 3$, por lo que la altura del árbol es 7. Los nudos correspondientes a una ST, con profundidad par (2, 4 y 6), se representan con rectángulos y los correspondientes a estados, con profundidad impar (1, 3, 5 y 7), con círculos. Cada ST tiene una etiqueta que la describe y cada estado tiene informado en el enlace entrante la probabilidad de ser alcanzado tras la realización de la ST en su nudo padre (vacío cuando la probabilidad es 1). Los estados de color verde y rojo corresponden respectivamente al resultado exitoso y fallido tras una PST, mientras que los de color azul corresponden al único resultado de una DST.

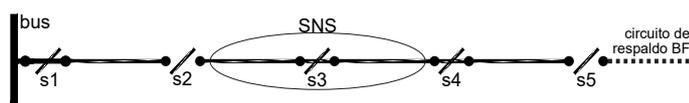


Figura 4.8 Ejemplo ilustrativo.

Una vez completado el árbol de decisiones se requiere calcular el beneficio agregado en cada nudo, en secuencia inversa al nivel de profundidad, comenzando por los nudos hoja y terminando en la raíz, de forma que:

- Cada nudo correspondiente a una ST, toma como beneficio agregado la suma de los beneficios agregados de sus nudos hijos, ponderado con la probabilidad de transición a cada uno de ellos.
- Cada nudo correspondiente a un estado, toma un beneficio agregado resultado de la suma del beneficio conseguido en la transición desde su nudo padre, $BST(k,m)$, y el valor máximo positivo del beneficio agregado de sus nudos hijos (cero, si ningún nudo hijo tiene un beneficio agregado positivo).

Una vez completado el cálculo del beneficio agregado para todos los nudos



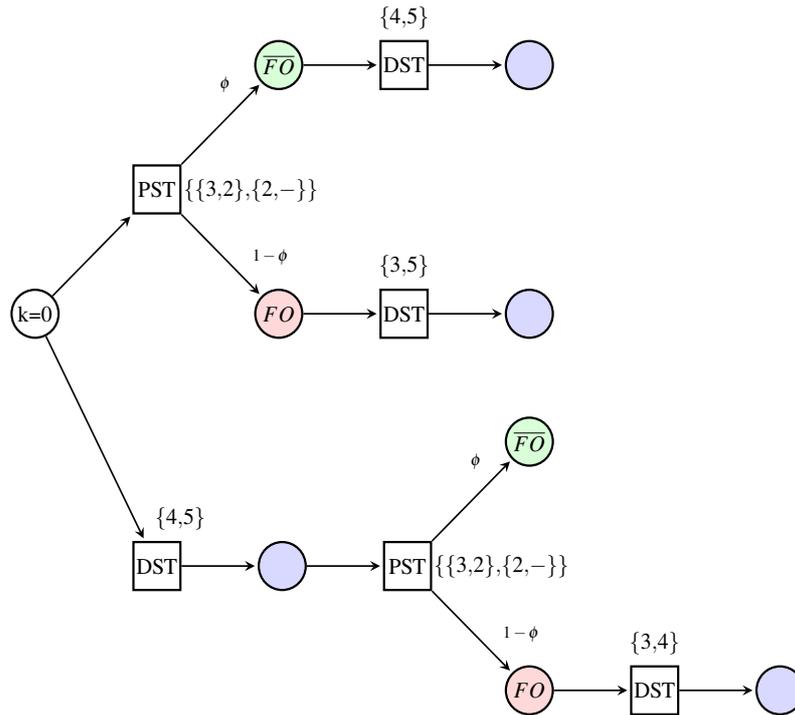


Figura 4.9 Árbol de avance del ejemplo ilustrativo.

del árbol de avance, se seleccionará como primera ST aquella correspondiente al nudo de profundidad 2 que presente un mayor beneficio agregado positivo. Una vez realizada la ST seleccionada y haya sido alcanzado el nuevo estado k , se repite el procedimiento hasta que no existan alternativas o ninguna presente un beneficio agregado positivo. En la repetición del procedimiento puede no ser necesario recalculer el árbol de decisiones si el nivel de profundidad con que ha sido calculado previamente es suficiente para tomar una nueva decisión de selección. En estos casos será suficiente considerar el subárbol de decisión con raíz en el nuevo estado alcanzado.

Nótese que no se han desechado las ST que tengan un beneficio $BST(k,m)$ negativo, ya que es posible que su realización favorezca el planteamiento de alternativas posteriores con beneficio positivo y finalmente esta ST tenga un beneficio agregado positivo.

En el apéndice B.3 se presenta con un ejemplo simple, las secuencias de ST seleccionadas mediante una búsqueda en profundidad del mayor beneficio esperado. En un primer escenario se muestra el árbol de avance en una representación



análoga a la descrita para la Figura 4.9, y se relacionan las ST seleccionadas en comparación con las obtenidas con el procedimiento de selección en un solo paso. En un segundo escenario sobre este mismo ejemplo, de la comparación del impacto total esperado resultante de ambos procedimientos, se concluirá que el método más simple consigue resultados muy próximos a los del criterio más exhaustivo en tiempos mucho más reducidos.

4.6.4 Ampliación de las reglas heurística en la metodología de búsqueda en profundidad

En el procedimiento de selección de ST en un solo paso, presentado en el apartado 4.3, solo se considera el mayor beneficio en la transición al siguiente estado conseguido por la realización de la ST. Las reglas heurísticas propuestas en 4.3.1, aseguran que cada ST candidata consiga una reducción del impacto GII que, en caso de ser mayor que el coste de su realización, ofrecería un beneficio positivo. En ningún caso una ST que no consiguiese reducir GII sería seleccionada según este criterio.

Sin embargo, en el procedimiento de selección de ST mediante una búsqueda en profundidad del mayor beneficio esperado presentado en 4.6.3 no se descartan aquellas ST que ofrezcan un beneficio negativo tras su realización, ante la posibilidad de que su beneficio agregado acabe siendo positivo al avanzar en el árbol de decisiones. Esto ocurrirá cuando la realización de esta ST permita la viabilidad de posteriores ST que no era posible considerar como candidatas previamente. Como ampliación a este procedimiento se propone ampliar ligeramente el conjunto de reglas heurísticas, introduciendo una nueva regla, definida como regla 0, y dos modificaciones de las reglas 1 y 4 respecto a cómo están definidas en el apartado 4.3.1:

- DST para la división de una sección de red desenergizada (regla 0). Consiste en una DST $m = \{o, -\}$ que divide una sección de red desenergizada en otras dos secciones. Esta DST no conseguirá reducir el GII y por tanto del coste de su realización resultará un beneficio negativo, pero puede favorecer el cumplimiento de las restricciones técnicas en posteriores actuaciones. Algebrai-



camente, o será cada dispositivo de seccionamiento cerrado, $[O(k-1)]_o = 0$, no energizado en $k-1$, $[B(k-1)]_o = 1$ y que no tenga aguas abajo a ningún elemento de $\mathcal{F}(k-1)$, lo que implica que $(S_{ox} \cdot F(k-1)) = 0$.

- DST para la reposición desde la cabecera del circuito (regla 1 modificada). Además del caso $m = \{-,c\}$ definido inicialmente para esta regla, se considera el par de maniobras $m = \{o,c\}$ cuando la sección aislada por c está energizada desde un circuito adyacente mediante el dispositivo de seccionamiento frontera cerrado o . En este caso, tras la realización de $m = \{o,c\}$ la sección previamente aislada por c pasa de estar energizada desde un circuito vecino a estarlo desde la cabecera del circuito. Aunque estas maniobras no consiguen reducir GII, cuando la sección afectada se interpone en el camino entre la cabecera del circuito y suministros interrumpidos, será posible obtener un beneficio agregado positivo al considerar posteriores ST. El criterio algebraico de c es el mismo descrito para la regla 1 en 4.3.1, y o es un dispositivo de seccionamiento frontera cerrado, $[Y \circ \overline{O(k-1)}]_o = 1$, ubicado aguas abajo de c , $S_{co} = 1$.
- PST con reposición de la sección de cabecera en caso de resultado fallido (FO) (regla 4 modificada). Se consideran con esta modificación dos alternativas para la regla 4. La primera es la ya descrita en 4.3.1, $m = (\{p,h\},\{h,-\})$, de forma que la primera secuencia de maniobras correspondiente a la PST se realiza en cualquier caso, y la segunda solo en caso de resultado fallido. La alternativa introducida se denota como $m = (\{p,h\},\{h,p\})$ que implica que en caso de resultado fallido también se devuelve p a su estado inicial cerrado. Ambas alternativas conseguirán el mismo valor de GII tras su realización aunque el coste asociado a la alternativa introducida, $m = (\{p,h\},\{h,p\})$, será siempre igual o mayor que la de $m = (\{p,h\},\{h,-\})$ dependiendo de la duración de la maniobra adicional. Cuando realizar esta última maniobra de cierre evite en una ST posterior volver a desplazarse a p , este menor coste quedará imputado en el beneficio agregado de PST presentada como alternativa.

En el apéndice C.3, para un ejemplo de red real, se extiende la comparación de los resultados obtenidos mediante una búsqueda en profundidad del mayor



beneficio esperado y mediante el procedimiento de selección en un solo paso. En un primer escenario en el que la capacidad disponible desde los circuitos adyacentes es suficiente para que la reposición de secciones sanas del circuito interrumpido se consiga con maniobras simples, ambos métodos de selección ofrecen la misma solución.

En un segundo escenario presentado en el apéndice C.3.2, se ha reducido la capacidad disponible desde los circuitos de respaldo, de forma que las reconfiguraciones requeridas para aislar secciones sanas que puedan ser repuestas desde estos, son más complejas de las contempladas en las reglas heurísticas más básicas. Será en este último caso donde plantear un procedimiento exhaustivo de selección que incorpore las nuevas reglas heurísticas, consigue un mejor resultado en términos de impacto total esperado.

4.6.5 Consideraciones sobre la realización aplazada de actuaciones

La reconfiguración realizada sobre un circuito interrumpido para conseguir la reposición del suministro permanecerá hasta que se repare el fallo y se restablezca el estado normal. Por tanto, en el momento en el que el OSD comienza a considerar qué ST realizar, debe tenerse en cuenta la situación más desfavorable para el cumplimiento de las restricciones durante el periodo en que se mantenga, que inicialmente es estimado según la medida $t_R(0)$.

Una vez realizada la reconfiguración del circuito y en el transcurso de las tareas de localización y reparación, es posible considerar hacer nuevas reconfiguraciones que consigan la reposición del servicio de más suministros. Estas nuevas configuraciones serán posibles en el momento en que el balance de demanda o potencia disponible desde circuitos adyacentes permita el cumplimiento de las restricciones técnicas que no hubiesen sido satisfechas inicialmente para la situación prevista más crítica.

Retomando el procedimiento desde el último estado alcanzado en su ejecución inicial con las nuevas condiciones de demanda y potencia disponible desde circuitos adyacentes, se obtendrían las ST requeridas para alcanzar el siguiente



estado de reposición, que podrán realizarse en el momento en que se verifique el cumplimiento de la nueva situación analizada.

En el apéndice C.3.2 se presenta un ejemplo en el que el procedimiento es realizado inicialmente, considerando la situación más restrictiva de capacidad disponible desde circuitos adyacentes. Con posterioridad a la reconfiguración del circuito que permite la reposición de parte del suministro afectado, se prevé que la demanda de unos determinados clientes se reduzca de forma que sea viable realizar un último ST que permite reponer más clientes. Al realizar este ST, cuando se den las nuevas condiciones contempladas que lo permiten, se consigue evitar que los nuevos clientes repuestos permanezcan interrumpidos el tiempo restante hasta la restitución del estado normal.

4.7 Conclusiones

En este capítulo, partiendo de la situación en la que se ha confirmado la existencia de una interrupción en un circuito, se ha descrito la continuación del procedimiento sistemático propuesto para asistir al OSD en la selección de actuaciones para el aislamiento del fallo y la reposición del suministro.

El procedimiento comienza proponiendo ampliar el uso de las consultas sobre el estado de alimentación de los clientes que en la primera parte desarrollada en el capítulo 3 se empleó para determinar el estado interrumpido. Se ha presentado un criterio de valoración de la utilidad de la información que pueden proporcionar los clientes para crear un mayor conocimiento sobre el conjunto de nudos sospechosos y la extensión de la interrupción. Con esta información adicional podría llegarse a identificar el DP que ha actuado, lo que permite delimitar la sección que contiene el fallo de una forma más rápida, incluso ser automatizada, y a menor coste que mediante la realización de maniobras.

A continuación, a partir de la definición del concepto de estado FDISR y sus medidas asociadas, se proponen una serie de reglas heurísticas para determinar secuencias de actuaciones de maniobras que aseguran el avance en la reposición



del suministro o aislamiento de la falta. Inicialmente se propone un método simple de selección de ST basado en el beneficio obtenido en su realización, referido como selección en un solo paso.

El planteamiento matemático que acompaña a la descripción metodológica permite obtener unos tiempos de computación muy reducidos en la resolución de este problema, incluyendo la verificación de las restricciones técnicas cuando se requiere. En un ordenador con microprocesador 3.20-GHz, Intel Core™ i5-4460, el planteamiento de las ST candidatas y su selección en un solo paso en un ejemplo de red real, característico de los más extensos que pueden encontrarse en las redes de distribución, consumen un tiempo menor de 250 milisegundos.

En el apartado 4.6.3 se ha presentado un criterio alternativo para la selección de ST que tiene en cuenta el beneficio esperado, no solo de la propia ST seleccionada, sino de las sucesivas ST que pudiesen resultar seleccionadas posteriormente. De la comparación de los resultados obtenidos para las redes de ejemplo de los apéndices B y C, se observa que el procedimiento más exhaustivo, que requiere de tiempos de computación mucho mayores, del orden de minutos, ofrece soluciones bastante cercanas a las obtenidas con el criterio más simple de un solo paso. Cuando se consideran las mismas reglas heurísticas, el procedimiento más exhaustivo presenta la ventaja de gestionar más eficientemente los desplazamientos de los equipos de operarios, ya que es capaz de prever el destino de estos en sucesivas actuaciones.

En el apartado 4.6.4 se propone ampliar el conjunto de reglas heurísticas cuando son empleadas en el procedimiento de selección de ST mediante búsqueda en profundidad del mayor beneficio esperado. Así, se alcanza una ventaja sustancial sobre el método de selección en un solo paso, cuando las reconfiguraciones requeridas para aislar secciones sanas que puedan ser repuestas desde circuitos adyacentes sean más complejas que las contempladas en las reglas heurísticas. Esta ventaja, a costa de un esfuerzo computacional mucho mayor, se ilustra en los resultados mostrados sobre el ejemplo de red real mencionado anteriormente. En el apéndice C.3 se presentan los resultados conseguidos con ambos procedimientos sobre este ejemplo de red real.



ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

5 Conclusiones finales

5.1 Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una metodología que puede resultar útil al operador de la red como herramienta en tiempo real en la gestión de incidencias en redes radiales de media tensión, para reducir los tiempos de indisponibilidad del suministro. La exposición metodológica se ha acompañado de un novedoso planteamiento matemático para su implementación, presentado en el capítulo 2, basado en la definición de un grafo funcional que permite homogeneizar las estructuras en las que se organizan los elementos que forman el circuito y su relación jerárquica en la configuración radial de operación.

A partir de la información disponible desde la señalización y las evidencias de interrupción del suministro, la primera parte del procedimiento sistemático presentado en el capítulo 3 permite generar conocimiento para identificar el estado normal o interrumpido de un circuito. Adicionalmente se presenta un criterio de selección de los clientes cuyo estado de alimentación supone una información útil en la creación de conocimiento adicional, cuando es necesario para identificar el estado del circuito. La utilidad para el OSD de esta metodología se hace más relevante en escenarios en los que puedan existir modificaciones en la configuración de las redes de distribución, variabilidad del estado de operación de la GD y



recepción automática de alertas de interrupción desde los equipos de medida telegestionados.

En el capítulo 4, se ha desarrollado la continuación del procedimiento, dirigido a guiar al OSD en la decisión sobre las actuaciones de maniobra a realizar, para avanzar en el aislamiento de la sección de red afectada y en la reposición del suministro. Las alternativas consideradas siguen unas reglas heurísticas que consiguen la reducción de un determinado índice de impacto de la interrupción sobre los suministros afectados, considerando conjuntamente la extensión de la interrupción (minorada por la reposición) y la duración estimada de la restitución del estado normal (acortada por el avance del aislamiento). Se ha propuesto un criterio simple de selección de las actuaciones propuestas, que en la situación más común, cuando la reposición desde circuitos vecinos está prevista en la planificación de la red, ofrece resultados eficientes con bajos tiempos de computación, comparado con alternativas más exhaustivas.

La exposición teórica de la metodología presentada se plantea inicialmente bajo una serie de simplificaciones para favorecer una exposición más didáctica y amplia. En cada capítulo que desarrolla la metodología, se presentan las variaciones requeridas para considerar otras hipótesis de partida, para modelar determinadas topologías de red y el comportamiento de nuevos dispositivos, y en general, para permitir su aplicación a redes reales.

5.2 Publicaciones

Con anterioridad a la etapa investigadora del doctorado, colaboré en el desarrollo de procedimientos orientados a la valoración de los índices de frecuencia y duración de las interrupciones en redes de distribución. En estos trabajos se considera un tratamiento analítico de los estados por los que evoluciona un circuito desde que se produce el fallo hasta la reparación de la avería, y se proponen medidas constructivas para reducir los índices de calidad obtenidos, evaluando su impacto. Los resultados obtenidos fueron expuestos en dos aportaciones en conferencias internacionales:



- [20] J. A. Rosendo, A. Gómez, J. L. Martínez, G. Tévar y M. Rodríguez. *Inca: A tool for the assessment and improvement of supply reliability indices. 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Barcelona, octubre 2007.
- [24] J. A. Rosendo, A. Gómez-Expósito, G. Tévar y M. Rodríguez. *Evaluation and improvement of supply reliability indices for distribution networks. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, abril 2008.

Las principales líneas del desarrollo metodológico y las conclusiones contenidas en esta Tesis, han sido publicadas en dos artículos de revistas técnicas de alto impacto:

- [56] M. Rodríguez-Montañés, J. A. Rosendo-Macías, A. Gómez-Expósito y G. Tévar. *Algebraic framework for outage information management in distribution networks. IEEE Transactions on Power Systems*, noviembre 2018.
- [57] M. Rodríguez-Montañés, J.A. Rosendo-Macías y A. Gómez-Expósito. *A systematic approach to service restoration in distribution networks. Electric Power Systems Research*, diciembre 2020.

5.3 Futuras líneas de investigación

Los reducidos tiempos de computación obtenidos, que resultan sobradamente suficientes para el uso que se pretende como herramienta en tiempo real, permiten plantear su aplicación a técnicas de análisis por simulación de fallos y evaluación de efectos (FMEA - Failure Modes and Effects Analysis) como futuras líneas de investigación. Las técnicas FMEA consisten en evaluar el efecto sobre la continuidad del suministro cuando se considera el fallo en un determinado elemento de red, modelando el comportamiento de las actuaciones automáticas y manuales, y



analizando la evolución del sistema en la localización y reparación de la avería, con estados intermedios de reposición del suministro.

Cuando se simula el fallo permanente de cada elemento de la red, caracterizado por su correspondiente tasa de fallo, la metodología presentada servirá para prever las actuaciones que acometería el OSD siguiendo el procedimiento propuesto, obteniéndose una valoración realista del alcance y duración de la interrupción de cada suministro.

Tras la falta inicial provocada por el fallo que se analiza, se pueden determinar los suministros que resultarán interrumpidos, y el tiempo de reacción del OSD en la identificación de esta circunstancia. Para un determinado estado de la GD, se puede reproducir la señalización que recibiría el OSD ante la falta inicial y los posibles intentos de reconexión, y de esta se cuantifica la duración de las tareas que llevaría a cabo el OSD hasta la detección del estado interrumpido, considerando el tiempo requerido para consultar a clientes. Por ejemplo, cuando exista señalización con conclusión inmediata del estado interrumpido, el tiempo de reacción será prácticamente nulo. En otros casos, en los que la alerta solo puede generarse a partir de las llamadas de clientes, deberá considerarse un determinado retraso hasta la recepción de reclamaciones teniendo en cuenta el número total de los afectados.

Para cada fallo simulado, estando determinado el SNS previo al comienzo de las tareas FDISR y el resultado que se obtendría tras la realización de una PST, la simulación de las secuencias de maniobra seleccionadas proporcionará el tiempo de interrupción de cada suministro hasta su reposición. Para un suministro que consiga ser repuesto en un determinado estado, su tiempo de interrupción se determina como la duración acumulada de las actuaciones previas. En caso de que un SS no consiga ser finalmente repuesto, la duración de su interrupción se extenderá al tiempo previsto para las tareas de localización y reparación del fallo.

La aportación de un determinado fallo a los índices de continuidad del suministro ([80]) sirve para determinar criterios de mantenimiento preventivo prioritario para incrementar la fiabilidad de los elementos cuyos fallos conllevan mayor impacto en la indisponibilidad. El registro de los resultados obtenidos cuando son agregados desde la perspectiva del suministro ([67, 81]), permite obtener una estimación



realista de los índices de frecuencia y duración de interrupciones.

La comparación de los resultados de frecuencia y duración de interrupciones obtenidos con la simulación FMEA, entre el estado real de las redes y el caso donde se introduce alguna variación, permite analizar la rentabilidad de inversiones ([21]) considerando el impacto esperado en los incentivos retributivos. En general, estas estrategias permiten a las empresas distribuidoras disponer de un criterio de valoración de las soluciones constructivas, funcionales y operacionales en la reducción en los índices de indisponibilidad esperados, con un planteamiento más simple que los abordados con redes neuronales ([51, 52]) o enumeración de estados ([23]).

Pueden destacarse las siguientes líneas de interés de estudio:

5.3.1 Instalación de nuevos dispositivos distribuidos y mejora funcional de los dispositivos existentes

La instalación de dispositivos de protección ([82]) permite reducir el número de suministros que se ven afectados por la actuación de un DP para despejar la falta. La señalización asociada a la actuación de los DP y los DPF, ofrecen información al OSD que permite alertar al OSD de la situación de falta y proporciona información adicional para reducir el SNS en caso de confirmación del estado interrumpido.

Al instalar más DS se incrementan las posibilidades de generar secciones aisladas en el circuito, lo que favorece la utilización de la capacidad disponible desde circuitos vecinos para la reposición del suministro en cumplimiento de las restricciones técnicas. En general, al instalarse nuevos DS, se incrementan las alternativas de maniobra disponibles, favoreciendo una estrategia de operación más eficiente en el avance de las tareas FDISR.

En comparación con la instalación de nuevos dispositivos [83], se puede considerar la mejora funcional ([28]) de los ya instalados en la red. Por ejemplo, dotar a un determinado DP de la capacidad de señalización podría reducir el tiempo de reacción del OSD al concluir inmediatamente su actuación y por tanto identificando



la interrupción.

Incorporar la capacidad de reconexión automática en un DP permite reducir la frecuencia de interrupciones ya que reduce las tasas de fallo de los dispositivos que provocan su actuación en la parte correspondiente a los fallos espurios. Además esta capacidad permite que, cuando existe SAFRA, la señalización de las faltas tras las reconexiones fallidas pueda ser interpretada para conseguir información adicional sobre el estado del circuito y la ubicación del fallo. Sin embargo cuando en un circuito se incorporan DP con esta capacidad, se introduce una incertidumbre adicional sobre el estado del circuito en caso de no recibir SAFRA, lo que puede implicar mayores retrasos para la identificación del estado de alimentación.

Adicionalmente puede considerarse mejorar los dispositivos de detección de paso de falta reduciendo las restricciones funcionales previas (señalización no orientada, etc.).

5.3.2 Modificaciones constructivas y reconfiguración de la red

La modificación de la configuración de un circuito puede favorecer la consecución de mejores resultados de continuidad. Por un lado, la redistribución de los suministros alimentados por un mismo circuito en varios circuitos menos extensos reduce la afección al suministro por actuación del DP de cabecera ante una falta. Si un circuito dispone de fronteras con posiciones de salida de subestación o circuitos vecinos, la consideración de estas reconfiguraciones solo implica detectar qué dispositivos de seccionamiento deben modificar su estado para conseguir la modificación topológica. En otros casos, para conseguir la reconfiguración topológica será necesario construir nuevos tramos que generen nuevas posiciones de salida desde subestación o creen mallas entre circuitos, acompañados de nuevos dispositivos de seccionamiento. La creación de nuevas fronteras incrementa las alternativas disponibles para la reposición del suministro, además de las ventajas expuestas de conseguir un estado de operación modificado.



5.3.3 Estrategias en la movilización de recursos y automatización

La presencia de algún DS con capacidad de actuación remota permite reducir la duración de las actuaciones de maniobra y por tanto conseguir una reposición del suministro, cuando sea posible, más rápida. Análogo beneficio puede esperarse cuando se dotan a los operarios de campo de recursos que les permitan reducir sus tiempos de desplazamiento. La simulación mediante técnicas FMEA modificando la capacidad de actuación remota de los dispositivos y la parametrización de los tiempos de desplazamiento y localización de fallo permitiría valorar el beneficio esperado por la mejora de estos recursos.

También puede considerarse realizar análisis de los beneficios asociados al despliegue de recursos de generación autónomos. Normalmente, las distribuidoras disponen de parques de autogeneradores móviles que pueden ser desplazados desde su ubicación de almacenamiento hasta una posición de un circuito interrumpido, para servir a la reposición del suministro. Determinar el impacto sobre los índices de continuidad de estos recursos como fuentes de alimentación alternativas, dependiente de los tiempos requeridos en su desplazamiento y conexión, puede servir para valorar una determinada estrategia para su movilización.

5.3.4 Análisis de criterios de fiabilidad en el acceso a las redes

En determinados casos, dependiendo de la regulación de cada país, las solicitudes de acceso de nuevos clientes a las redes de distribución están sujetas al cumplimiento de criterios de capacidad y mantenimiento de la fiabilidad.

El criterio de capacidad obedece a la viabilidad de atender a la nueva demanda solicitada en situación normal, considerando el dimensionamiento de la red y los suministros existentes y comprometidos. El estudio del criterio de fiabilidad considera si la conexión de la nueva solicitud constituye una merma a la capacidad de los suministros previos de ser repuestos en caso de contingencias, principalmente cuando la nueva demanda causa el incumplimiento de las restricciones técnicas en la reposición.



La aplicación del procedimiento desarrollado conjuntamente con técnicas FMEA supone una herramienta útil para realizar el estudio de los criterios de fiabilidad ante solicitudes de acceso. Incluso puede plantearse su uso para determinar los refuerzos en la red que son requeridos para la aceptabilidad de una solicitud por los criterios analizados.

Otras líneas futuras, más ambiciosas, pudieran considerar la utilización de esta metodología off-line para construir reglas de actuación en la programación de automatismos ([54]) en la reposición (self-healing), ya sea de forma centralizada ([27]) por el OSD o para implementarse mediante la coordinación de elementos distribuidos en las redes (multi-agents) ([26]).

ÁMBITO- PREFIJO**GEISER**

Nº registro

00008745e2000046100**CSV****GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960****DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN****<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>****FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO****30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular**

Apéndice A

Metodología algebraica para el procesamiento de la información

A.1 Matriz de sucesores de un árbol radial

Sea el árbol radial, o con raíz, $\mathbf{G} = \{\mathcal{N}, \mathcal{E}\}$, donde \mathcal{N} es el conjunto de tamaño n de los nudos del grafo y \mathcal{E} el conjunto de tamaño $n - 1$ de los enlaces orientados desde la raíz. La matriz binaria de sucesores S , de orden $n \times n$ tiene su término S_{ij} igual a uno cuando el nudo j pertenece al subárbol de \mathbf{G} con raíz en i , por lo que $S_{ii} = 1$. Si $S_{ij} = 1$, entonces i es un nudo en el camino entre j y la raíz de \mathbf{G} (camino troncal de j). Cuando los índices de los nudos están ordenados en la secuencia correcta, S se puede disponer en forma triangular.

Para este tipo de árboles, a partir de la relación presentada en [84] entre la matriz de incidencia A y la denominada matriz de caminos (path matrix), puede ponerse que:

$$S = -A^{-1} \tag{A.1}$$



Siendo un árbol orientado, la matriz de incidencia puede conseguirse como $A = (M - I)$, donde M es la matriz de adyacencia.

En la práctica, sin embargo, los elementos no nulos de la matriz S pueden ser obtenidos más eficientemente aplicando algoritmos basados en inspección de grafos o métodos algebraicos que impliquen operaciones menos exigentes. También puede determinarse la matriz de sucesores algebraicamente, empleando la matriz de adyacencia M con la operación multiplicación, de forma que $S_{ij} = 1$ cuando:

$$[(M + I)^{h-2}]_{ij} > 0 \quad (\text{A.2})$$

donde I es la matriz identidad de orden n y h es la altura del árbol G . De esto, puede conseguirse S multiplicando la matriz $(M + I)$ por sí misma hasta que el número de términos mayores que cero en el resultado quede invariante. Una ordenación de los índices de nudos del árbol, en la que ningún nudo tiene un índice superior a otro nudo con mayor profundidad, asegura que la matriz de sucesores S sea diagonal superior.

En la Figura A.1 se muestra un ejemplo de árbol radial con 10 nudos, con índices ordenados en profundidad y raíz en el nudo 1. Las matrices de adyacencia M , de incidencia A y de sucesores S de este árbol de ejemplo se muestran en la Figura A.2.

La fila i -ésima de la matriz S , S_{ix} , es un vector binario que contiene el valor unidad en los términos correspondientes a los nudos que están aguas abajo de i , incluido él mismo. En la Figura A.3 se muestra para el árbol ejemplo, el vector fila S_{2x} resaltado. Este vector fila tiene el valor unidad en los términos correspondientes a los nudos $\{2,3,4,5,6\}$ que como se resalta en la representación del árbol en la misma figura, son los ubicados aguas abajo de 2, incluido él mismo.

La columna j -ésima de la matriz S , S_{xj} , es un vector binario que tiene el valor unidad en los términos correspondientes a los nudos que están en el camino troncal de j . En la Figura A.4 se muestra para el árbol ejemplo, la matriz S con el vector columna S_{x9} resaltado. Este vector columna tiene el valor unidad en los términos



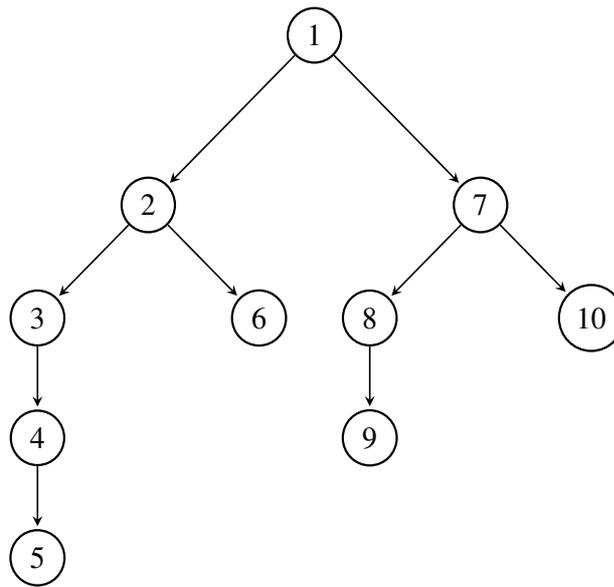


Figura A.1 Ejemplo de árbol radial de 10 nudos.

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura A.2 Matrices de adyacencia (M), de incidencia (A) y de sucesores (S) del árbol ejemplo de 10 nudos.



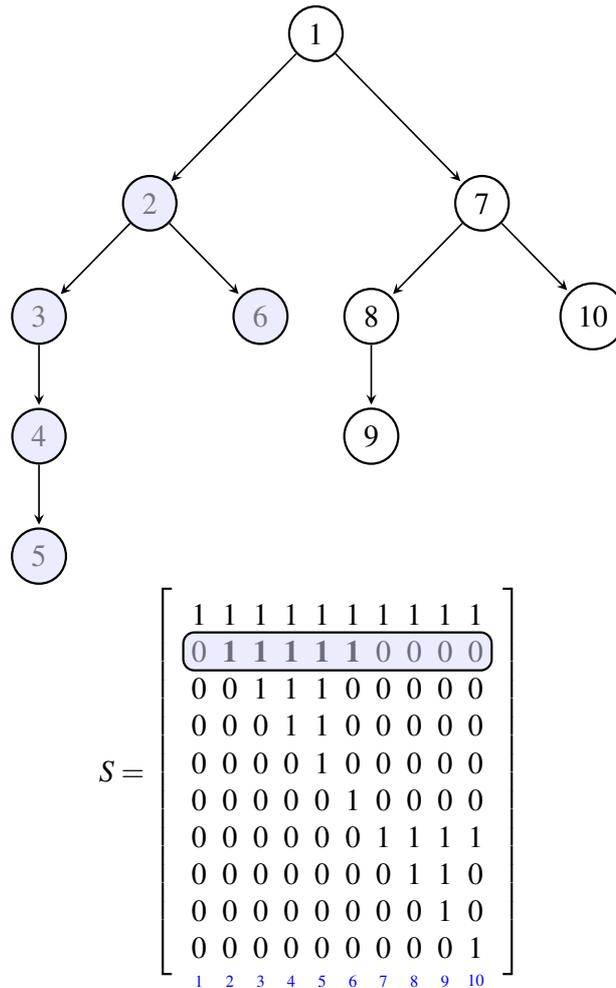


Figura A.3 Componentes fila de la matriz S del ejemplo de 10 nodos.

correspondientes a los nodos $\{1,7,8,9\}$ que como se resalta en la representación del árbol en la misma figura, son los contenidos en el camino troncal de 9. Cuando j es el índice del nudo raíz, se cumple que el vector columna S_{xj} solo tiene un elemento distinto de cero en el término j -ésimo.

Cuando $[S]_{ij} = 1$, es decir, cuando j está aguas abajo de i , el vector $S_{ix} \cdot S_{xj}$ codifica los nodos que están en el camino entre entre los nodos i y j , ambos incluidos. El número de nodos en este camino será $[S^2]_{ij}$

- $[S^2]_{ij}=1$ cuando $i = j$.



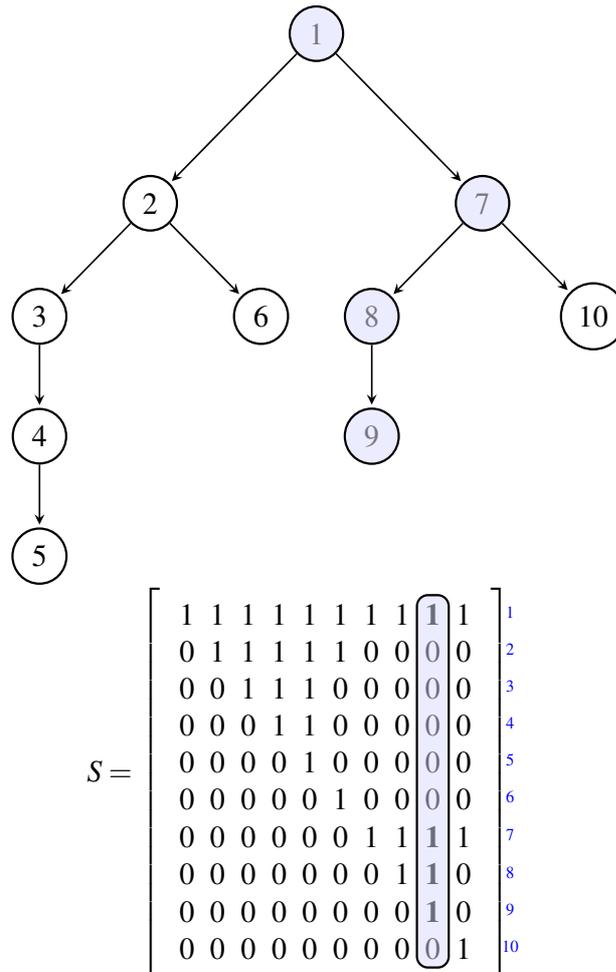


Figura A.4 Componentes columna de la matriz S del ejemplo de 10 nudos.

- Cuando $[S]_{ij} = 1$ se cumple que $[S^2]_{ij} - 1 = [S \cdot (S - I)]_{ij}$.
- El valor máximo del vector fila $[S \cdot (S - I)]_{ix}$ es la altura del nudo i .
- Cuando i corresponde a la raíz del árbol, $[S \cdot (S - I)]_{ij}$ es la profundidad del nudo j .
- El valor máximo de $[S \cdot (S - I)]$ es la altura del árbol. Este valor se encuentra en la fila correspondiente a su raíz.



- La matriz de adyacencia puede reconstruirse a partir de S dado que $[M]_{ij}=1$ si $[S^2]_{ij} = 2$, lo que es lo mismo que si $[S \cdot (S - I)]_{ij} = 1$.

A.2 Operaciones sobre la matriz de sucesores

Para simplificar la exposición, se define una relación unívoca entre cualquier subconjunto de nudos $\mathcal{X} \subseteq \mathcal{N}$ y un respectivo vector columna binario X de tamaño $n \times 1$ en que se codifican los índices de los nudos contenidos en \mathcal{X} .

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i \in \mathcal{X} \\ 0 & \text{si } i \notin \mathcal{X} \end{cases}$$

Nótese que el conjunto está representado con fuente caligráfica mientras que su vector correspondiente lo está en fuente latina. Así, el vector N está compuesto de n unos.

- Si $\mathcal{Z} = \mathcal{X} \cup \mathcal{Y}$, entonces $Z = X \vee Y$.
- Si $\mathcal{Z} = \mathcal{X} \cap \mathcal{Y}$, entonces $Z = X \circ Y$.
- Si $\mathcal{Z} = \mathcal{X} \setminus \mathcal{Y}$, entonces $Z = X - (X \circ Y)$.

El vector columna $S \cdot X$ tiene en su término i -ésimo el número de nudos de \mathcal{X} aguas abajo de $i \in \mathcal{N}$. Análogamente, el vector columna $S^t \cdot X$ tiene en su término i -ésimo el número de nudos de \mathcal{X} en el camino troncal de $i \in \mathcal{N}$.

A.2.1 Identificación de subgrafos en G determinados por un subconjunto de nudos

Sea el conjunto de nudos $\mathcal{X} \subseteq \mathcal{N}$, puede considerarse que G es el bosque formado por tantos árboles disjuntos como elementos haya en \mathcal{X} , cada uno de estos



árboles con raíz en cada uno de los nudos de \mathcal{X} . Así, se define la matriz binaria C_X que codifica cómo se distribuyen los nudos de \mathcal{N} en cada uno de estos árboles determinados por \mathcal{X} , de forma que en su fila i -ésima se codifican los nudos del correspondiente con raíz en $i \in \mathcal{X}$.

Para poder determinar algebraicamente C_X , se presenta una expresión para obtener una extracción de filas y columnas de S , determinada por dos conjuntos $\mathcal{X}, \mathcal{Y} \subseteq \mathcal{N}$, de la siguiente forma:

$$S(\mathcal{X}, \mathcal{Y})_{ij} = \begin{cases} S_{ij} & \text{si } i \in \mathcal{X} \text{ y } j \in \mathcal{Y} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

que algebraicamente puede obtenerse como

$$S(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) = \text{diag}(X) \cdot S \cdot \text{diag}(Y) \quad (\text{A.4})$$

La expresión (A.5) corresponde al número de nudos de \mathcal{Y} contenidos en el camino entre $i \in \mathcal{X}$ y el nudo $j \in \mathcal{N}$ ubicado aguas abajo.

$$[S(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) \cdot S]_{ij} \quad (\text{A.5})$$

Para el caso en que $\mathcal{X} = \mathcal{Y}$, la expresión (A.6) corresponde al número de nudos de \mathcal{X} en el camino entre $i \in \mathcal{X}$ y $j \in \mathcal{N}$. Por lo tanto (A.6) tiene el valor unidad cuando i es el nudo de \mathcal{X} ubicado inmediatamente aguas arriba de $j \in \mathcal{N}$.

$$[S(\mathcal{X}, \mathcal{X}) \cdot S]_{ij} \quad (\text{A.6})$$

De esto, se tiene que $[C_X]_{ij} = 1$ cuando $[S(\mathcal{X}, \mathcal{X}) \cdot S]_{ij} = 1$.

En la Figura A.5 se ilustra el caso para el árbol ejemplo de 10 nudos y el conjunto $\mathcal{X} = \{1, 2, 3\}$. En esta Figura se resaltan en los mismos colores los árboles



determinados por \mathcal{X} contenidos en el árbol radial del ejemplo y las filas de C_X que los codifican.

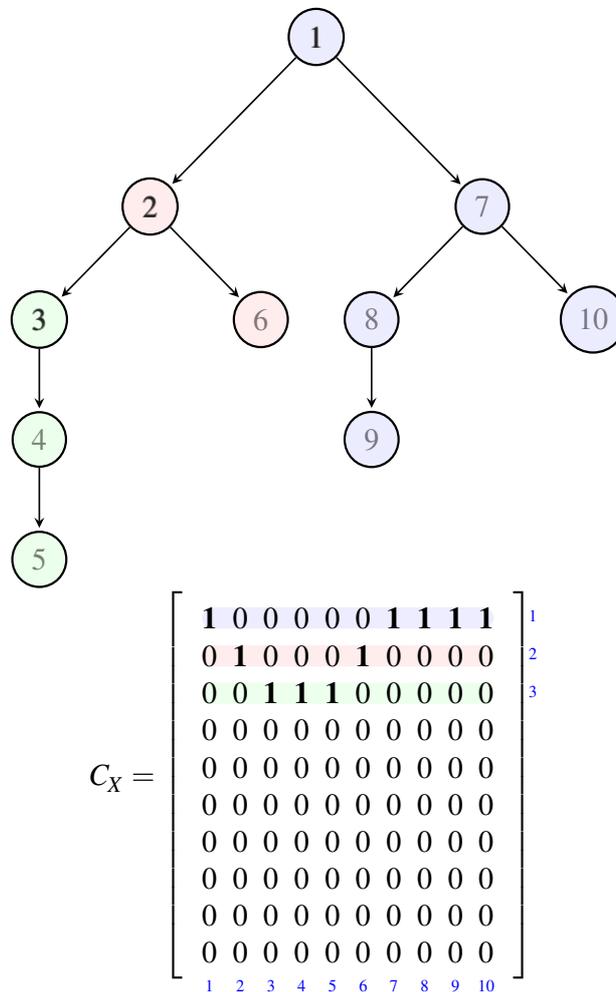


Figura A.5 Ejemplo de identificación de árboles contenidos en el ejemplo de 10 nudos, determinados por $\mathcal{X} = \{1,2,3\}$.

A.2.2 Grafo funcional del circuito radial reorientado

Sea un circuito radial MT en estado normal de operación, y S la matriz de sucesores de su grafo funcional G . Este circuito estará alimentado desde su cabecera en barras de SE que se corresponde con el nudo raíz del grafo funcional (nudo 1 en el ejemplo).



Se define $\mathbf{G}^{[c]} = \{\mathcal{N}, \mathcal{E}^{[c]}\}$, grafo funcional del mismo circuito cuando la fuente de su energización cambia al elemento correspondiente al nudo c , es decir, el circuito se reorienta radialmente desde c . El grafo funcional $\mathbf{G}^{[c]}$ tendrá el mismo conjunto de nudos que \mathbf{G} , pero tendrá raíz en c y diferente conjunto de enlaces. Denotando por $\mathcal{N}_c \subseteq \mathcal{N}$ el conjunto de los nudos que se encuentran en el camino troncal de c en \mathbf{G} , el conjunto de enlaces $\mathcal{E}^{[c]}$ se construye con:

- Los enlaces de \mathcal{E} que son salientes de los nudos no en \mathcal{N}_c .
- Los enlaces de \mathcal{E} entre dos nudos de \mathcal{N}_c , invirtiendo su sentido.
- Nuevos enlaces entre cada nudo de \mathcal{N}_c y todos sus hermanos en \mathbf{G} , con sentido saliente del nudo en \mathcal{N}_c .

De esto resulta que todos los hermanos en \mathbf{G} de un nudo en \mathcal{N}_c pasan a ser sus hijos en $\mathbf{G}^{[c]}$.

En la figura A.6 se muestra resaltado en azul los nudos en \mathcal{N}_6 para el ejemplo de 10 nudos. Los enlaces en $\mathcal{E}^{[6]}$ que son coincidentes con enlaces en \mathcal{E} se muestran en color negro. En azul se representan los enlaces que unen los mismos nudos en ambos grafos pero con sentido contrario. En trazo discontinuo se muestran los enlaces originales de \mathcal{E} que no están en $\mathcal{E}^{[6]}$ y en rojo los nuevos enlaces que aparecen en $\mathcal{E}^{[6]}$.

La matriz de sucesores $S^{[c]}$ de este grafo funcional $\mathbf{G}^{[c]}$ puede determinarse algebraicamente a partir de S sin necesidad de construir el grafo.

El conjunto de los nudos troncales de j en \mathbf{G} , \mathcal{N}_j está codificado por S_{xj} , j -ésima columna de S . El camino troncal de j en $\mathbf{G}^{[c]}$ (camino entre j y c) contiene los nudos que son exclusivos de los dos caminos troncales de c y j en \mathbf{G} , además de, en cualquier caso, ambos nudos. Los nudos exclusivos de dos conjuntos son aquellos que están en cualquier de estos dos conjunto pero no en ambos, lo que se determina mediante sus respectivos vectores con el operador lógico disyunción exclusiva (exclusive or). De esta forma, el conjunto de nudos en el camino troncal



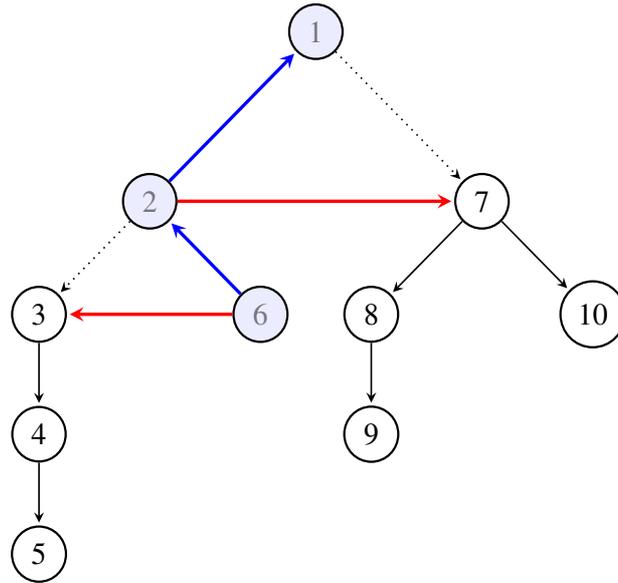


Figura A.6 Representación de la reorientación del ejemplo de 10 nudos desde el nudo 6.

de j en $\mathbf{G}^{[c]}$, codificado por $S_{xj}^{[c]}$ puede determinarse algebraicamente como

$$S_{xj}^{[c]} = (S_{xc} \oplus S_{xj}) \vee I_{xi} \vee I_{xj} \tag{A.7}$$

Observando la Figura A.1 el camino troncal de 5 está formado por $\mathcal{N}_5 = \{1,2,3,4,5\}$, y el de 6 está formado por $\mathcal{N}_6 = \{1,2,6\}$. Los nudos que son exclusivos de estos dos caminos troncales son $\{3,4,5,6\}$, que como se aprecia en la Figura A.6 son los que forman parte del camino troncal de 5 en $\mathbf{G}^{[6]}$.

Por lo tanto, la matriz de sucesores de $\mathbf{G}^{[c]}$, $S^{[c]}$, se obtiene con la expresión:

$$S^{[c]} = (S \oplus (S_{xc} \cdot N^t)) \vee I \vee (I_{xc} \cdot N^t) \tag{A.8}$$

En la Figura A.7 se muestra la matriz de sucesores $S^{[6]}$



$$S^{[6]} = \begin{matrix} \left[\begin{array}{cccccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{array} \\ \begin{array}{cccccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{array} \end{matrix}$$

Figura A.7 Matriz de sucesores $S^{[6]}$ en el ejemplo de 10 nudos.

A.2.3 Secuencias de recorrido en profundidad de un árbol

Se presenta en este apartado un procedimiento para extraer de la matriz de sucesores S , información sobre la secuencia de nudos correspondiente a un recorrido en profundidad de \mathbf{G} . Se requerirá adicionalmente, establecer un criterio para determinar el orden en que se realiza el recorrido en profundidad entre nudos hermanos, una vez alcanzado su padre.

En la Figura A.8 se muestra sobre el árbol ejemplo de 10 nudos, una secuencia de recorrido en profundidad siguiendo las flechas de color azul en el orden que indica su etiqueta. Esta secuencia sigue el criterio propuesto en la que, por simplicidad de interpretación, hemos supuesto que la longitud asociada a cada nudo es la unidad. Se observa que las flechas azules de trazo continuo, coinciden con enlaces de \mathbf{G} , pero no así las que presentan trazo discontinuo. Los enlaces de \mathbf{G} que no se corresponden con transiciones del recorrido propuesto, se muestran de color negro.

Nótese que los nudos en \mathcal{N} y los enlaces de la secuencia del recorrido forman un árbol lineal orientado (árbol de recorrido), asociado a \mathbf{G} , que denotamos como \mathbf{G}^d , para la que puede determinarse su matriz de sucesores S^d . En la Figura A.9 se muestra la matriz de sucesores S^d correspondiente al árbol de recorrido para el árbol ejemplo de 10 nudos mostrado en la Figura A.8.

De esta matriz S^d pueden destacarse las siguientes observaciones:



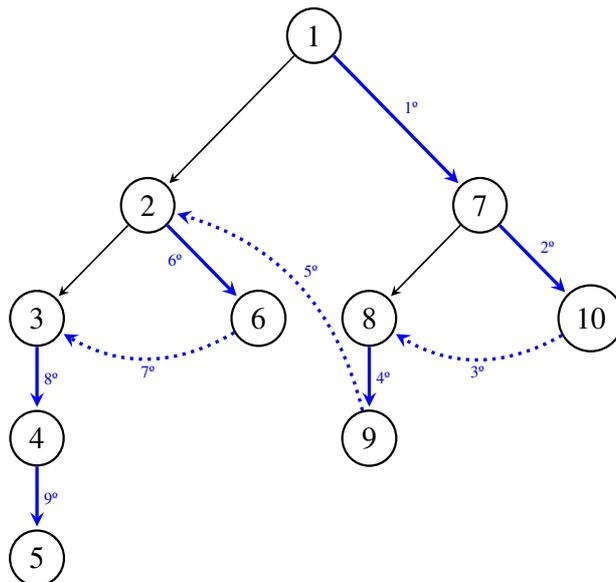


Figura A.8 Recorrido en profundidad en el ejemplo de 10 nudos.

$$S^d = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix}$$

Figura A.9 Matriz de sucesores S^d de la secuencia de recorrido en el ejemplo de 10 nudos.

- Al ser G^d un árbol lineal, la columna j -ésima de S^d codifica los nudos visitados previamente cuando se alcanza j .
- El vector $(S^d)^t \cdot E$ proporciona un vector que en su término i -ésimo contiene el ordinal en el que el nodo i será alcanzado en la secuencia de recorrido determinada por G^d . Una reetiquetación de los nudos acorde a este orden, consigue que la matriz de sucesores S^d sea triangular superior.
- Los términos de la matriz de adyacencia del árbol de recorrido, M^d , y de



la matriz de adyacencia del árbol original, M , son simultáneamente igual a uno, en los términos correspondientes a enlaces en ambos grafos, \mathbf{G} y \mathbf{G}^d . En el ejemplo anterior, corresponde a los enlaces azules de trazo continuo. Por tanto, la matriz binaria $(M^d \circ \overline{M})$ tiene términos no nulos en los índices correspondientes a los nudos unidos por enlaces del árbol de recorrido que no existen en \mathcal{E} , que en la Figura A.8 tienen un trazo discontinuo. Ambas matrices de adyacencia pueden conseguirse a partir de la correspondiente matriz de sucesores, como se describió en (A.1).

La matriz de sucesores S^d puede obtenerse algebraicamente a partir de S y de la parametrización necesaria para aplicar el criterio de orden en el recorrido. Para esto se requiere inicialmente identificar los nudos con más de un enlace saliente, que denotaremos en el conjunto $\mathcal{N}_v \subset \mathcal{N}$. En un árbol radial estos nudos serán aquellos con un grado de emisión mayor que uno, por lo que $[N_v]_i = 1$ cuando $[M \cdot E]_i > 1$.

Se define la matriz V que contiene la relación de los nudos en \mathcal{N}_v con sus hijos. De esta forma, $[V]_{ij} = 1$, cuando $j \in \mathcal{N}$ es hijo del nudo $i \in \mathcal{N}_v$, lo que se cumple cuando $[\text{diag}(N_v) \cdot S \cdot (S - I)]_{ij} = 1$.

La matriz V_r tiene los mismos términos no nulos que V , donde $[V_r]_{ij}$ es el ordinal correspondiente al orden en que se visitará el nudo j entre todos los hijos de i . De esta forma $[V_r]_{ij} = 1$ si tras alcanzar i , el recorrido continua en primer lugar por el subárbol con raíz en j , antes de alcanzar a otros hijos de i .

Puesto que esta herramienta se aplicará para modelar el desplazamiento de operarios a través del trazado de un circuito eléctrico, se decide priorizar el recorrido por los nudos que presenten una menor longitud de línea máxima hasta sus hojas, para lo que se requiere disponer del vector de longitud de cada tramo de línea, $length$. Se define el vector H , tal que $[H]_i$ contiene la longitud máxima de los caminos troncales de los nudos aguas abajo de i , que corresponde al valor máximo del vector fila $[S \circ (N \cdot length^t \cdot S)]_{ix}$. Así V_r para el criterio considerado se determina a partir de la ordenación, de menor a mayor, de los valores no nulos en cada fila de la matriz $V \cdot \text{diag}(H)$.



Cuando, siguiendo el recorrido se llega a un determinado nudo i , se habrán visitado previamente todos los nudos de su camino troncal en \mathbf{G} , además de algunas ramas de este camino troncal, si el criterio escogido les ha asignado esta precedencia. La matriz V_e se define para contener información sobre las ramas (subárboles) que ya se han visitado cuando el recorrido llega a un determinado nudo. Así, $[V_e]_{ij} = 1$ cuando el subárbol con raíz en j habrá sido recorrido previamente a que se alcance al nudo i , lo que se cumple cuando $[S^t \cdot (V^t \cdot V_r - V_r^t \cdot V)]_{ij} < 0$

Puesto que, como se describió anteriormente, la columna j -ésima de S^d codifica los nudos visitados previamente cuando se alcanza j , estos serán los nudos en el camino troncal de j en \mathbf{G} , y los nudos aguas abajo en \mathbf{G} de cualquier nudo k que verifique que $[V_e]_{ik} = 1$. De esto resulta que la matriz S^d se obtiene como:

$$S^d = (V_e \cdot S)^t + S \quad (\text{A.9})$$

En la Figura A.10 se muestran los vectores y matrices requeridas para el cálculo de S^d del árbol de recorrido en el ejemplo de 10 nudos mostrado en la Figura A.8. Obsérvese que $[V \cdot \text{diag}(H)]_{1,2} = 5$ ya que el nudo 2 tiene aguas abajo nudos con camino troncal de una longitud máxima de 5, mientras que para su nudo hermano, 7, esta longitud máxima es 4, $[V \cdot \text{diag}(H)]_{1,7} = 4$. De la ordenación de menor a mayor de los valores no nulos de la primera fila de $V \cdot \text{diag}(H)$, resulta que $[V_r]_{1,2} = 2$ y $[V_r]_{1,7} = 1$, lo que implica que el recorrido comenzará primero por el nudo 7 y se completará en profundidad antes de alcanzar a 2 lo que queda recogido en $[V_e]_{2,7} = 1$. Una vez calculadas estas matrices, a partir de la expresión A.9 se consigue la matriz de sucesores S^d que se mostró en la Figura A.9.

En 4.4.2 se ha presentado una formulación algebraica para determinar el vector de tiempo de localización de un fallo, $T_{loc}(k)$, cuando esta tarea requiere recorrer en profundidad el subgrafo que forman los elementos en $\mathcal{F}(k)$, inspeccionando cada elemento alcanzado. Esta formulación emplea dos matrices, cuyo cálculo refiere a este apéndice:

- La matriz $FS(k)$, que contiene información sobre qué elementos han sido necesario inspeccionar en $\mathcal{F}(k)$, antes de llegar a encontrar el fallo, de



$$\begin{matrix}
 N_v = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &
 H = \begin{bmatrix} 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 5 \\ 3 \\ 4 \\ 4 \\ 4 \\ 3 \end{bmatrix} &
 V \cdot \text{diag}(H) = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} &
 \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix}
 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix}
 V_r = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} &
 V_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} &
 \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix}
 \end{matrix}$$

Figura A.10 Estructuras matriciales relacionadas con el cálculo de S^d en el ejemplo de 10 nudos.

forma que $[FS]_{ij} = 1$ si para llegar a encontrar en fallo en i , se ha requerido inspeccionar previamente j .

- La matriz binaria $BS(k)$, que contiene información sobre qué desplazamientos, adicionales a los implicados en la inspección, se requieren realizar en la secuencia de búsqueda sobre $\mathcal{F}(k)$, de forma que $[BS]_{ij} = 1$ cuando el nudo j es el siguiente nudo a inspeccionar tras el nudo hoja i , y por lo tanto sin ser j un hijo de i .

Análogamente a la definición presentada en A.2.1, la expresión

$$S^d(\mathcal{F}(k), \mathcal{F}(k)) = \text{diag}(\mathcal{F}(k)) \cdot S^d \cdot \text{diag}(\mathcal{F}(k)) \tag{A.10}$$



permite obtener una extracción de filas y columnas de S^d para los elementos contenidos en $\mathcal{F}(k)$.

Siendo S^d la matriz de sucesores del árbol de recorrido de un circuito radial, cuya columna j -ésima codifica los nudos visitados previamente a encontrar el fallo en j , cuando se limita la localización del fallo al conjunto $\mathcal{F}(k)$, se tendrá que:

$$FS(k) = (S^d(\mathcal{F}(k), \mathcal{F}(k)))^t$$

Nótese que la matriz S^d puede ser precalculada para el circuito, requiriéndose únicamente calcular $S^d(\mathcal{F}(k), \mathcal{F}(k))$ a medida que varía $\mathcal{F}(k)$. Sea $M^d(k)$ la matriz de adyacencia de este árbol de recorrido del subgrafo, calculada a partir de $S^d(\mathcal{F}(k), \mathcal{F}(k))$ como se describió en A.1, se tiene que:

$$BS(k) = (M^d(k) \circ \overline{M})$$

En la Figura A.11 se muestran las matrices $FS(k)$ y $BS(k)$ para el árbol ejemplo de 10 nudos cuando $\mathcal{F}(k) = \mathcal{N}$, es decir, cuando la inspección se extiende a todo el árbol siguiendo el recorrido que se muestra en la Figura A.8.

$$\begin{matrix}
 FS(k) = \begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix} &
 BS(k) = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}
 \begin{matrix}
 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10
 \end{matrix}$$

Figura A.11 Matrices $FS(k)$ y $BS(k)$ en el ejemplo de 10 nudos.



Apéndice B

Ejemplo de red simple

B.1 Descripción del circuito de ejemplo

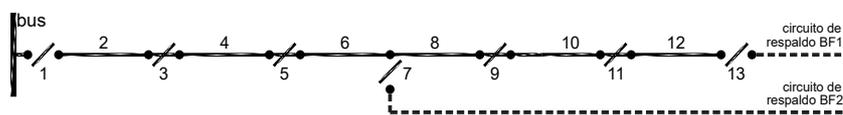


Figura B.1 Representación unifilar del ejemplo de red simple.

Se presenta un ejemplo de circuito radial de ejemplo para ilustrar la aplicación de la metodología propuesta en el capítulo 4 orientado al aislamiento del fallo y reposición del suministro. La representación unifilar de este circuito se muestra en la Figura B.1, en la que cada elemento está numerado, partiendo desde la cabecera del circuito, en el nudo 1. Los índices {2,4,6,8,10,12} corresponden a línea eléctrica y {1,3,5,7,9,11,13} son DS, de los cuales {7,13}, normalmente abiertos, son frontera con dos circuitos adyacentes de respaldo (backup feeder) etiquetados respectivamente como BF2 y BF1.



Se considera que cada tramo de línea tiene la misma tasa de fallo, tiempo de inspección ($2t$), tiempo de reparación ($5t$) y demanda conectada (p). Se asume que los dispositivos $\{1,13\}$ son de actuación remota y que para el resto de los DS se requiere el desplazamiento hasta su ubicación de un único equipo de operarios disponible desde su ubicación previa, inicialmente en la cabecera del circuito. El tiempo de desplazamiento del equipo de operarios a través de un tramo de línea es de $0.2t$. Por simplicidad, se desprecia la parametrización asociada a los DS, así como el tiempo requerido en la realización de las maniobras una vez que los operarios alcanzan su ubicación cuando se requiere su actuación manual.

En la situación de partida, se conoce que este circuito se encuentra en estado interrumpido por actuación del DP 1, aislando el circuito de su cabecera y por tanto el todo el suministro permanece interrumpido. Con la información disponible no se tiene ningún conocimiento sobre la ubicación del fallo, por lo que el SNS se extiende a todo el circuito. Se escoge cuantificar la extensión de la interrupción en términos de demanda, de forma que la las medidas asociadas al instante $k = 0$ son $q(0) = 6p$, $t_R(0) = 12t$ y $GII(0) = 72pt$.

Sobre este circuito, se distinguen dos escenarios diferenciados por la capacidad disponible desde los circuitos adyacentes, BF1 y BF2, que el OSD determina en el estado inicial para el periodo que se ha previsto que dure la interrupción, $t_R(0) = 12t$. En el primer escenario (A) la capacidad disponible desde cada circuito adyacente de respaldo es $3p$. En el segundo escenario (B) la capacidad disponible desde BF1 se reduce a p , mientras que la de BF2 sigue siendo $3p$.

A continuación, para cada escenario, se exponen los resultados obtenidos con el procedimiento de selección de secuencias de maniobra en un sólo paso, descrito en el apartado 4.3.3, y los obtenidos con el procedimiento de selección con búsqueda en profundidad del mayor beneficio esperado, presentado en el apartado 4.6.3.



B.2 Selección de ST en un sólo paso

B.2.1 Escenario A

En la Tabla B.1 se relacionan las ST consideradas como candidatas, y seleccionadas, en cada instante, del caso particular en que el fallo se ha producido en el tramo de línea 2. La primera columna contiene el valor de k , instante para el que se valoran cada ST candidata contenida en $\mathcal{M}(k-1)$, y que es referida en la segunda columna. De la tercera a quinta columna se muestran los valores esperados de $GII(k,m)$, $STC(k,m)$ y $STB(k,m)$, evaluados según se describió en el apartado 4.4.5. Nótese que solo se muestran los candidatos para los que $STB(k,m)$ es positivo y que la ST seleccionada, correspondiente al valor máximo de $STB(k,m)$, está resaltada en negrita. Una vez realizada la ST seleccionada y validado el estado alcanzado, en las columnas sexta a octava se muestran los valores conseguidos $q(k)$, $t_R(k)$ y $GII(k)$.

Tabla B.1 Red simple, escenario A, caso de fallo en 2 - ST candidatas y seleccionadas en un solo paso.

k	regla:ST	$GII(k,m)$ (pt)	$STC(k,m)$ (pt)	$STB(k,m)$ (pt)	$q(k)$ (p)	$t_R(k)$ (t)	$GII(k)$ (pt)
0		6	12	72			
1	4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$	52.8	1.2	18	4	10	40
	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$	42.6	2.4	27			
	4 : $\{\{9,1\},\{1,-\}\}$	45.3	4.8	21.9			
	5 : $\{\{9,1\},\{1,13\}\}$	32	4.8	35.2			
	4 : $\{\{11,1\},\{1,-\}\}$	56.2	6	9.8			
	5 : $\{\{11,1\},\{1,13\}\}$	47	6	19			
2	4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$	27.2	2.4	10.4	2	8	16
	5 : $\{\{3,1\},\{1,7\}\}$	22	2.8	15.2			
	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$	24	1.6	14.4			
	5 : $\{\{5,1\},\{1,7\}\}$	16	2	22			
3	4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$	10.5	0.8	4.7	1	7	7
	5 : $\{\{3,1\},\{1,5\}\}$	7	1	8			

La primera ST seleccionada es la PST $\{\{9,1\},\{1,13\}\}$, para la que se evalúa un beneficio esperado de $35.2pt$. De la realización de esta ST, existe una proba-



bilidad de $\frac{1}{3}$ de conseguir el resultado exitoso (\overline{FO}), lo que permitiría conseguir $q(1,m|\overline{FO}) = 2p$ por la reposición desde la cabecera del circuito de la demanda en 2, 4, 6 y 8, y una reducción del SNS para la que se obtendría $t_R(1,m|\overline{FO}) = 8t$. Complementariamente, el resultado fallido (FO) tras la PST se conseguiría con una probabilidad de $\frac{2}{3}$, consiguiéndose la reposición desde BF1 de la demanda de 10 y 12, $q(1,m|FO) = 4p$, y una reducción del SNS con $t_R(1,m|FO) = 10t$. En ambos casos, al disponer el DS 13 de actuación remota, la duración espera de la ST será $d(m|\overline{FO}) = d(m|FO) = 0.8t$. Una vez realizada la PST seleccionada, el resultado será fallido al energizarse el fallo en 2, y por tanto en el estado consecuente se tendrá $q(1) = 4p$, $t_R(1) = 10t$, $GII(1) = 40pt$.

Al quedar abierto el DS 9 en $k = 1$, es posible plantear como candidatas dos PST según la regla 5 en las que la sección de cola creada, en caso de resultado fallido, quedaría energizada desde BF2 con el cierre del DS 7. Una de estas PST, $\{\{5,1\},\{1,7\}\}$ es la ST seleccionada, que al realizarse y obtenerse un resultado fallido, consigue que $q(2) = 2p$, $t_R(2) = 8t$, $GII(2) = 16pt$.

La última ST seleccionada será de nuevo una PST, $\{\{3,1\},\{1,5\}\}$ que concluye igualmente con resultado fallido. En este caso la energización de la sección de cola creada por la apertura del DS 3 no se consigue con el cierre de un DS frontera con otro circuito, sino que es el cierre del DS 5, abierto en la PST anterior, lo que permite energizar el tramo de línea 4 desde BF2.

Habiendo quedado la sección del fallo reducido al tramo de línea 2, no existe otra ST candidata y por tanto se finaliza la etapa de aislamiento del fallo y reposición del suministro, concluyéndose con $q(3) = 1p$, $t_R(3) = 7t$, $GII(3) = 7pt$. El coste de las tres actuaciones ha resultado ser, por orden, $4.8pt$, $2.4pt$ y $1.2pt$, que sumadas a $GII(3) = 7pt$, eleva el impacto total de la interrupción a $15.4pt$, un 21.4% del valor del impacto estimado inicial, $72pt$. En la Figura B.2 se muestra la gráfica de GII para la secuencia de maniobras seleccionadas en este caso, según se describió de forma genérica en la Figura 4.5.

Como se refirió en el apartado 4.5, el impacto total de la interrupción será el mismo en todos los casos correspondientes al fallo de elementos que estén en la misma sección aislable, $\mathcal{W}(i)$ donde $i \in \mathcal{W}$. En la Tabla B.2 se presentan los



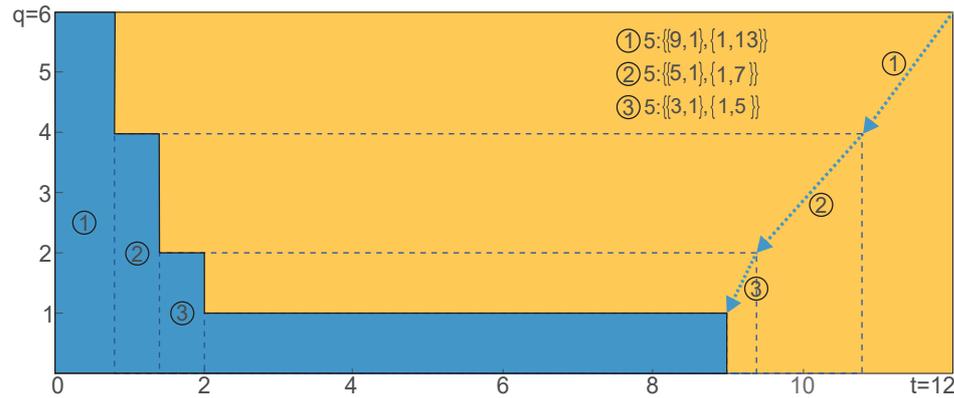


Figura B.2 Red simple, escenario A, caso de fallo en 2 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso.

resultados obtenidos en este escenario ante el fallo en cada sección aislable. En esta Tabla, la primera columna muestra cada conjunto $\mathcal{W}(i)$ y la segunda columna muestra el número de fallos por año de los elementos de estos conjuntos contenidos en el SNS inicial, conseguido a través de las tasas de fallo (λ por tramo de línea). La tercera columna contiene el impacto total de la interrupción conseguido con la sucesión de ST seleccionadas, que se muestra en la cuarta columna. Nótese que el tramo de línea 2, para cuyo fallo se ha descrito el resultado del procedimiento, está contenido en $\mathcal{W}(1)$.

El impacto total esperado de la interrupción en el escenario A, obtenida de la media de los valores de la tercera columna ponderado por los valores de la segunda columna, resulta $16.8pt$, el 23.3% del impacto inicial. Empleando este índice medio puede cuantificarse el efecto de haber considerado la PST según la regla 5 en el conjunto de reglas heurísticas. Si solo se hubiesen considerado las reglas 1 a 4, el impacto total esperado de la interrupción se eleva a $18.6pt$, el 25.8% del impacto inicial.



Tabla B.2 Red simple, escenario A - Sucesión de ST seleccionadas en un solo paso.

Conjunto	Fallos año	Impacto total (<i>pt</i>)	ST
$\mathcal{W}(1)$	λ	15.4	5 : $\{\{9,1\},\{1,13\}\}$ 5 : $\{\{5,1\},\{1,7\}\}$ 5 : $\{\{3,1\},\{1,5\}\}$
$\mathcal{W}(3)$	λ	15	5 : $\{\{9,1\},\{1,13\}\}$ 5 : $\{\{5,1\},\{1,7\}\}$ 5 : $\{\{3,1\},\{1,5\}\}$
$\mathcal{W}(5)$	2λ	22.6	5 : $\{\{9,1\},\{1,13\}\}$ 5 : $\{\{5,1\},\{1,7\}\}$
$\mathcal{W}(9)$	λ	12.6	5 : $\{\{9,1\},\{1,13\}\}$ 5 : $\{\{11,9\},\{9,13\}\}$
$\mathcal{W}(11)$	λ	12.6	5 : $\{\{9,1\},\{1,13\}\}$ 5 : $\{\{11,9\},\{9,13\}\}$

B.2.2 Escenario B

En este segundo escenario, a diferencia del anterior, el OSD determina que la capacidad disponible desde BF1 se reduce a p , mientras que la de BF2 sigue siendo $3p$. En estas condiciones, no es viable considerar en $\mathcal{M}(0)$ la PST $\{\{9,1\},\{1,13\}\}$ que fue seleccionada en primer lugar en el escenario A, ya que la capacidad disponible desde BF1 es insuficiente para reponer la sección de cola en caso de resultado fallido. En este escenario, la primera ST seleccionada será la PST $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$.

Para el mismo caso que se presentó en el escenario A, cuando el fallo se ha producido en el tramo de línea 2, la PST $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ no consigue reponer ningún suministro, pero reduce el tiempo estimado hasta la restitución del estado normal a $t_R(1) = 8t$, como se muestra en la Tabla B.3. La segunda ST seleccionada, la DST $\{11,7\}$, repone con éxito la mitad de la demanda interrumpida desde BF2 pero no reduce el SNS y, por lo tanto, como se muestra en la Figura B.3, la finalización del incidente se retrasa por la duración de la ST realizada. La tercera ST seleccionada, la DST $\{-,7\}$, no reduce el tiempo de resolución pero en este



caso, al tratarse de una maniobra remota, se obtiene la reposición de la demanda alimentada desde 10 sin que se retrase la conclusión de la reparación.

La cuarta ST será la PST $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$ que concluye con el aislamiento del tramo que contiene el fallo, quedando finalmente que $q(3) = 2p$, $t_R(3) = 7t$, $GII(3) = 14pt$. En la Figura B.3 se ilustra como el impacto total de la interrupción se ha reducido a $23.2pt$, que supone un 32.3% del valor inicial. Nótese que aunque el tiempo estimado de finalización de la reparación es menor que en el caso análogo del escenario A, en este caso la demanda alimentada desde 2 y 4 se mantienen interrumpidas hasta la finalización de la reparación.

Tabla B.3 Red simple, escenario B, caso de fallo en 2 - ST candidatas y seleccionadas en un solo paso.

k	regla : ST	GII(k,m) (pt)	STC(k,m) (pt)	STB(k,m) (pt)	$q(k)$ (p)	$t_R(k)$ (t)	GII(k) (pt)
1	4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$	52.8	1.2	18	6	8	48
	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$	42.6	2.4	27			
	4 : $\{\{9,1\},\{1,-\}\}$	45.3	4.8	21.9			
	4 : $\{\{11,1\},\{1,-\}\}$	56.2	6	9.8			
	5 : $\{\{11,1\},\{1,13\}\}$	47	6	19			
2	3 : $\{9,7\}$	32	3.6	12.4	3	8	24
	3 : $\{11,7\}$	24	6	18			
	3 : $\{11,13\}$	40	3.6	4.4			
	4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$	38.5	1.2	8.3			
3	2 : $\{-,13\}$	16	0	8	2	8	16
	4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$	17.5	1.2	5.3			
4	4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$	10.5	0.8	4.7	2	7	14

En la Tabla B.4 se presentan los resultados obtenidos para el escenario B ante el fallo en cada sección aislable. Nótese que al disponerse de la misma información inicial, la primera ST seleccionada siempre es la misma, la PST $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$, y la segunda ST seleccionada cambia dependiendo de si el fallo está ubicado aguas abajo o no del DS 5.

En la Tabla B.5 se relacionan las ST consideradas como candidatas y seleccionadas en el caso en que el fallo se ha producido en el tramo de línea 10 (nudo contenido en $\mathcal{W}(9)$). En este caso, el impacto total de la interrupción resulta ser



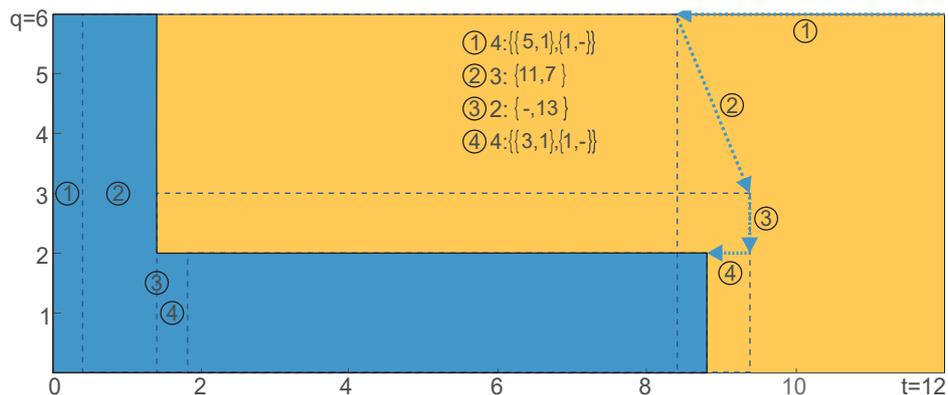


Figura B.3 Red simple, escenario B, caso de fallo en 2 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso.

16.6pt (23% del valor inicial), como puede observarse en la Figura B.4.

Tabla B.4 Red simple, escenario B - Sucesión de ST seleccionadas en un solo paso.

Conjunto	Fallos año	Impacto total (pt)	ST
$\mathcal{W}(1)$	λ	23.2	4 : {{5,1},{1,-}} 3 : {11,7} 2 : {-,13} 4 : {{3,1},{1,-}}
$\mathcal{W}(3)$	λ	16.2	4 : {{5,1},{1,-}} 3 : {11,7} 2 : {-,13} 4 : {{3,1},{1,-}}
$\mathcal{W}(5)$	2λ	33.9	4 : {{5,1},{1,-}} 5 : {{11,5},{5,13}} 4 : {{9,5},{5,-}}
$\mathcal{W}(9)$	λ	16.6	4 : {{5,1},{1,-}} 5 : {{11,5},{5,13}} 4 : {{9,5},{5,-}}
$\mathcal{W}(11)$	λ	14.2	4 : {{5,1},{1,-}} 5 : {{11,5},{5,13}}



Tabla B.5 Red simple, escenario B, caso de fallo en 10 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso.

k	regla : ST	GII(k,m) (pt)	STC(k,m) (pt)	STB(k,m) (pt)	q(k) (p)	$t_R(k)$ (t)	GII(k) (pt)
1	4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$	52.8	1.2	18	4	10	40
	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$	42.6	2.4	27			
	4 : $\{\{9,1\},\{1,-\}\}$	45.3	4.8	21.9			
	4 : $\{\{11,1\},\{1,-\}\}$	56.2	6	9.8			
	5 : $\{\{11,1\},\{1,13\}\}$	47	6	19			
2	4 : $\{\{9,5\},\{5,-\}\}$	24	3.2	12.8	3	9	27
	4 : $\{\{11,5\},\{5,-\}\}$	28.7	4.8	6.5			
	4 : $\{\{11,5\},\{5,13\}\}$	22	4.8	13.2			
3	4 : $\{\{9,5\},\{5,-\}\}$	18.3	2.4	6.3	1	7	7

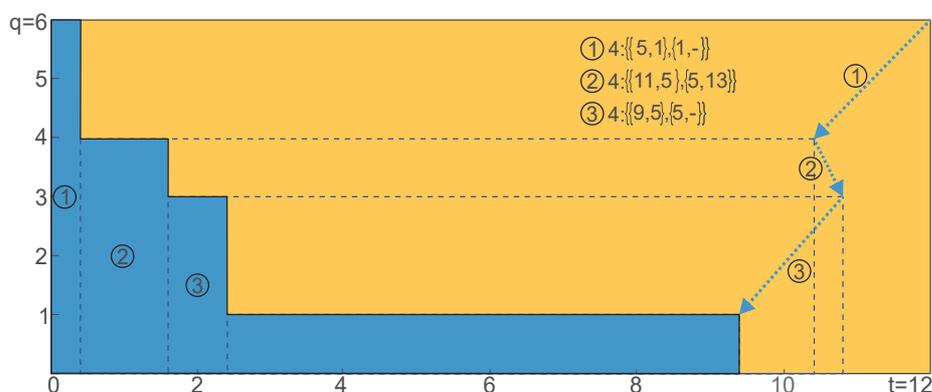


Figura B.4 Red simple, escenario B, caso de fallo en 10 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso.

B.3 Selección de ST mediante búsqueda en profundidad

B.3.1 Escenario A

En la Figura B.5 se muestra el árbol de decisiones descrito en el apartado 4.6.3, planteado en el instante inicial $k = 0$ del escenario A con una profundidad máxima de dos pasos, $k_{max} = 2$. En esta representación se observa que el mayor beneficio agregado (mostrado, entre paréntesis, los coeficientes que multiplican a pt) de los ST a seleccionar en primer lugar corresponde a la PST $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ con un valor de $40.9pt$. Cuando se extiende la profundidad máxima del árbol de decisiones a



$k_{max} = 3$, se obtiene la misma ST seleccionada, en esta ocasión con un beneficio agregado esperado de 51 *pt*, e igualmente para $k_{max} = 4$ con un beneficio agregado de 53.8 *pt*.

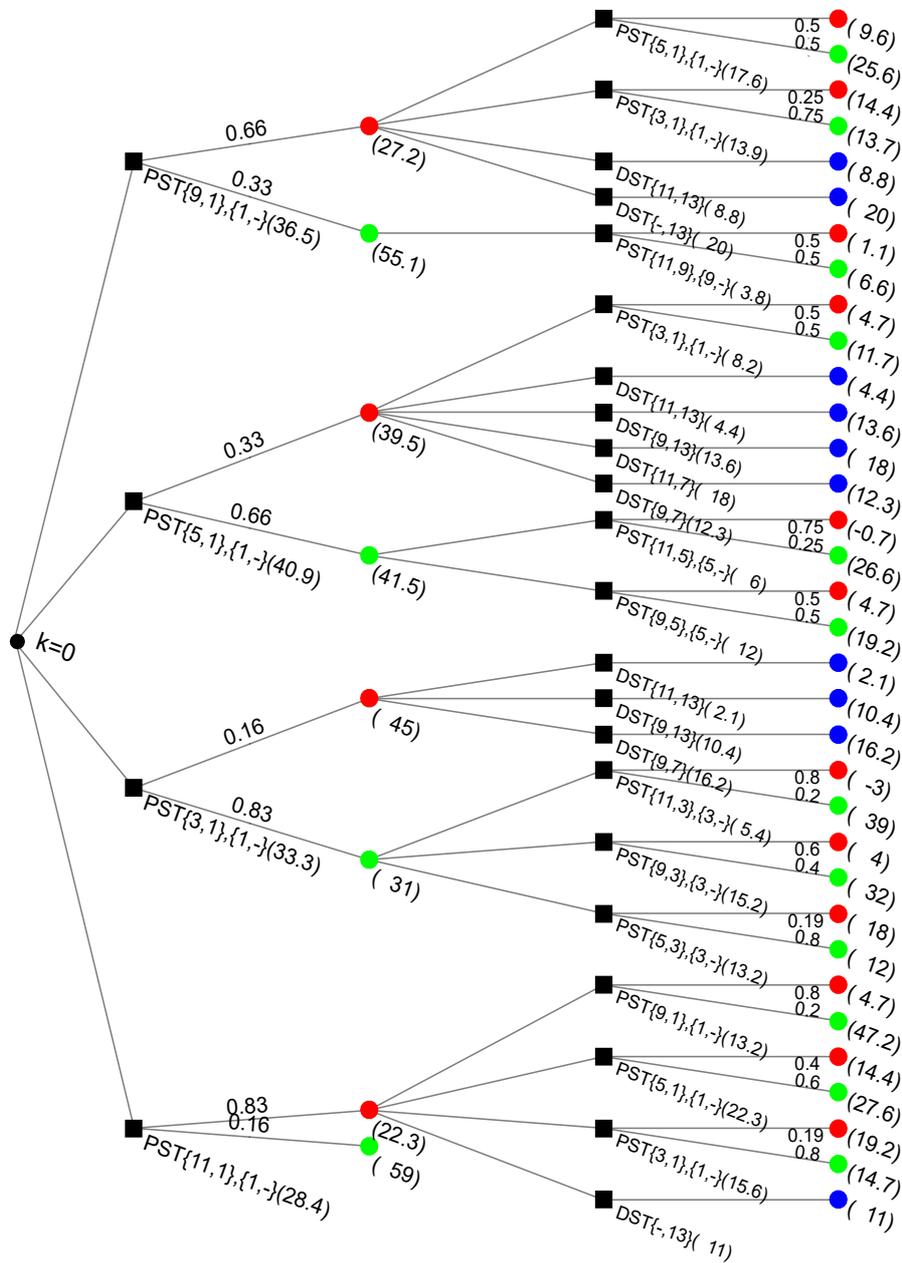


Figura B.5 Árbol de decisiones correspondiente al escenario A.



En la Tabla B.6 se relacionan las secuencias de maniobras seleccionadas mediante búsqueda en profundidad del mayor beneficio esperado en el escenario A, cuando el elemento fallado es el tramo de línea 2. Estas ST consiguen un impacto total de 13.8pt frente a los 15.4pt que se conseguía con el procedimiento de selección en un solo paso. Nótese que en ambos casos, maniobrando los mismos dispositivos de maniobra, se consigue la misma reposición del suministro así como aislar completamente el tramo que contiene el fallo.

La mejora en la reducción del impacto total se consigue al reducir la duración de las actuaciones. Esto es porque el procedimiento de búsqueda en profundidad prevé la conveniencia de realizar las actuaciones en el orden en que se deben desplazar los operarios a los dispositivos 5, 7 y 9, evitando así los retrocesos que se dan con el procedimiento de selección en un solo paso. En la Figura B.6, sobre el área de color naranja correspondiente a la reducción del impacto conseguido con el procedimiento de selección con búsqueda en profundidad, se destaca en un tono más claro la reducción conseguida respecto a las secuencias realizadas con el método de selección en un solo paso ilustrado en la Figura B.2.

Tabla B.6 Red simple, escenario A, caso de fallo en 2 - ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad.

k	regla:ST	$q(k)$ <i>clientes</i>	$t_R(k)$ <i>horas</i>	GII(k) <i>horas-clientes</i>
0		6	12	72
1	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$	6	8	48
2	3 : $\{9,13\}$	4	8	32
3	2 : $\{-,7\}$	2	8	16
4	4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$	2	7	14
5	2 : $\{-,5\}$	1	7	7

En la Tabla B.7 se muestran las ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad y el impacto total conseguido para todas las ubicaciones posibles del fallo, que puede compararse con los resultados obtenidos con la selección en un solo paso, mostrado en la Tabla B.2. Con este procedimiento de selección de ST más exhaustivo, para el escenario A se consigue un impacto total esperado de 16.5pt (23 % del impacto inicial), mejor resultado que el conseguido con el procedimiento de selección en un sólo paso de 16.8pt (23.3 % del impacto inicial).



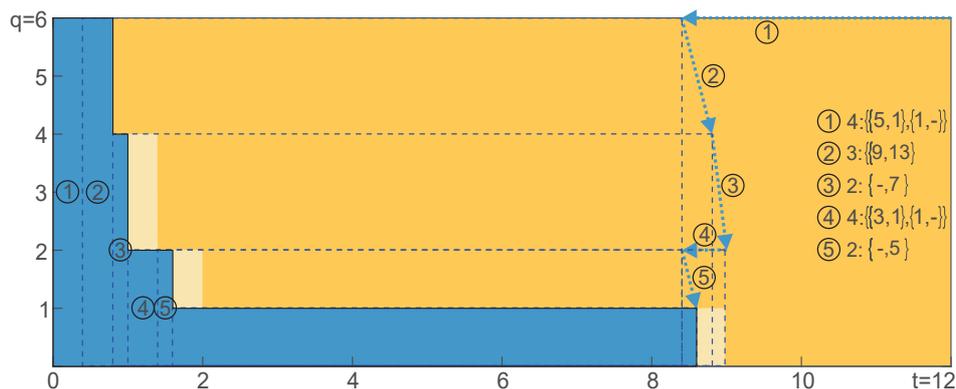


Figura B.6 Red simple, escenario A, caso de fallo en 2 - Gráfica GII de las ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad.

Nótese que la selección de ST en ambos métodos, atiende al mayor beneficio esperado, considerando la probabilidad del resultado de las PST. Así, puede ocurrir que un criterio de selección más exhaustivo, aun contemplando un mayor valor esperado del beneficio, ofrezca peores resultados en impacto total para ciertas localizaciones del fallo. Esto puede observarse de la comparación de las tablas B.2 y B.7 en los casos en los que el fallo resulte estar ubicado en $\mathcal{W}(9)$ o en $\mathcal{W}(11)$.

B.3.2 Escenario B

Análogamente, en la Tabla B.8 se muestran las ST seleccionadas con el procedimiento mediante búsqueda en profundidad para el escenario B, alcanzando un impacto total esperado de $21.9pt$ (30.5% del impacto inicial). Al igual que en para el escenario A, este resultado es mejor que el obtenido con el procedimiento de selección en un solo paso, para el que se consigue $23pt$ (31.9% del impacto inicial). De la comparación de las tablas B.8 y B.4 se observa que en este caso el método exhaustivo siempre ofrece soluciones con un impacto total de la interrupción menor o igual que el método más simple.



Tabla B.7 Red simple, escenario A - Sucesión de ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad.

Conjunto	Fallos año	Impacto total (<i>pt</i>)	ST
$\mathcal{W}(1)$	λ	13.8	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ 3 : $\{9,13\}$ 2 : $\{-,7\}$ 4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$ 2 : $\{-,5\}$
$\mathcal{W}(3)$	λ	13.4	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ 3 : $\{9,13\}$ 2 : $\{-,7\}$ 4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$
$\mathcal{W}(5)$	2λ	21.8	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ 4 : $\{\{9,5\},\{5,-\}\}$ 2 : $\{-,13\}$
$\mathcal{W}(9)$	λ	14.2	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ 4 : $\{\{9,5\},\{5,-\}\}$ 4 : $\{\{11,9\},\{9,-\}\}$ 2 : $\{-,13\}$
$\mathcal{W}(11)$	λ	14.2	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ 4 : $\{\{9,5\},\{5,-\}\}$ 4 : $\{\{11,9\},\{9,-\}\}$



Tabla B.8 Red simple, escenario B - Sucesión de ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad.

Conjunto	Fallos año	Impacto total (<i>pt</i>)	ST
$\mathcal{W}(1)$	λ	22.8	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ 3 : $\{11,13\}$ 2 : $\{-,7\}$ 4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$
$\mathcal{W}(3)$	λ	15.8	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ 3 : $\{11,13\}$ 2 : $\{-,7\}$ 4 : $\{\{3,1\},\{1,-\}\}$
$\mathcal{W}(5)$	2λ	32.3	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ 4 : $\{\{9,5\},\{5,-\}\}$ 3 : $\{11,13\}$
$\mathcal{W}(9)$	λ	14.2	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ 4 : $\{\{9,5\},\{5,-\}\}$ 4 : $\{\{11,9\},\{9,-\}\}$ 2 : $\{-,13\}$
$\mathcal{W}(11)$	λ	14.2	4 : $\{\{5,1\},\{1,-\}\}$ 4 : $\{\{9,5\},\{5,-\}\}$ 4 : $\{\{11,9\},\{9,-\}\}$



Apéndice C

Ejemplo de red real

C.1 Descripción del circuito de ejemplo

En este apéndice se presenta un ejemplo de la aplicación de la metodología desarrollada en este trabajo sobre un circuito real MT, ligeramente modificado para ilustrar más convenientemente los distintos casos descritos.

El grafo funcional de este circuito con 287 nudos, cuya matriz de sucesores se muestra en la Figura C.1, resulta representativo de los circuitos más extensos que pueden encontrarse en redes reales de distribución. Aun pudiendo disponer de esta matriz de sucesores precalculada, su cálculo no consume más de 5 milisegundos en un ordenador con microprocesador 3.20-GHz, Intel Core™ i5-4460.

En la Figura C.2 se muestra el esquema unifilar de este circuito, de una longitud total de 54.5 km, que suministra a 2205 clientes en un medio semirural a través de 77 CD. En la representación, en la que no se refleja la longitud real de los tramos de línea eléctrica, los CD y los DP se muestran como triángulos y cuadrados respectivamente, mientras que el símbolo '/' representa a los DS. Para no dificultar



la visualización del circuito, los identificadores de nudos mostrados se limitan a los de los elementos implicados en los casos descritos a continuación.

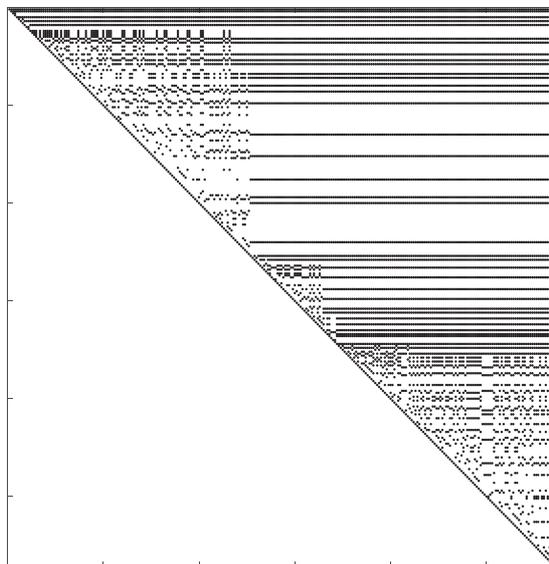


Figura C.1 Visualización de la matriz S del grafo funcional (287 nudos) del circuito de ejemplo.

De los ocho DP instalados en el circuito solo el DP en la cabecera del circuito, con el índice 1, dispone de funcionalidad de señalización. De los siete restantes distribuidos por el circuito, cuatro de ellos, {110,158,258,264}, son fusibles. El trazado del circuito transcurre inicialmente a través de área rural y en su sección final suministra a un área urbana la cual abarca el 30% de la longitud de línea total de circuito y el 80% de los clientes totales. Esta zona urbana se alimenta aguas abajo del DP 162, que no dispone de la funcionalidad de reconexión. Aproximadamente en la mitad de la longitud del trazado del circuito se encuentra el DP 36, que cuenta con la funcionalidad de reconexión para poder mitigar la afección sobre la zona urbana de los fallos espurios que pudiesen ocurrir en la zona rural que la precede. Finalmente, existe otro DP en 13 sin funcionalidad de reconexión, previsto para despejar las faltas de una zona de actividad agrícola.

Complementariamente a la señalización disponible en el DP en la cabecera del circuito, hay instalado un DPF en el nudo 179 que permite la recepción de alertas de falta ante fallos aguas abajo de su ubicación. Al tener este DPF capacidad de



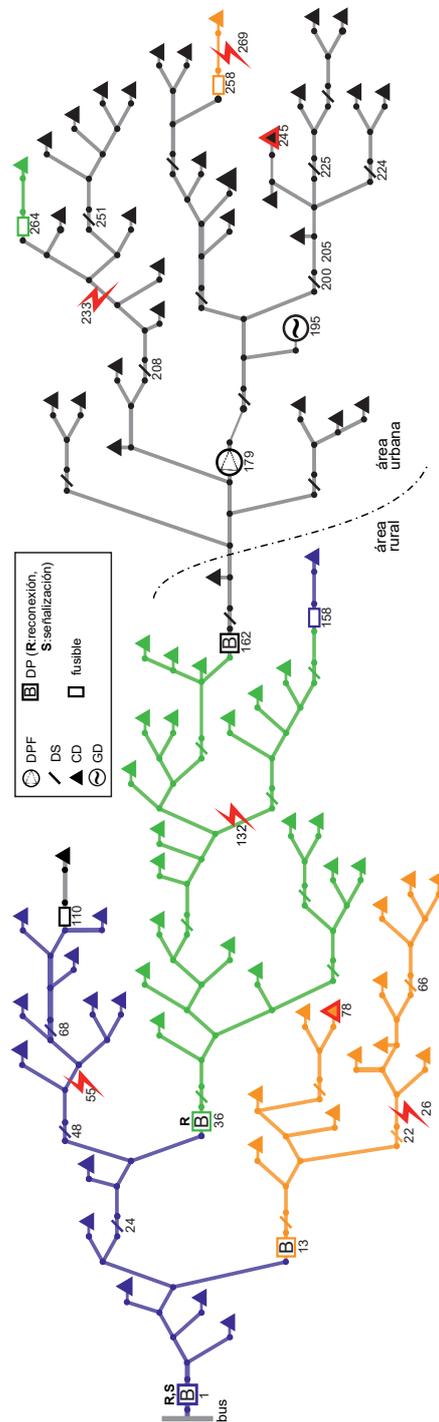


Figura C.2 Representación unifilar del ejemplo de red real.



señalización orientada, cuando la GD en 195 está operativa, permitirá detectar adicionalmente la corriente de falta en caso de fallo de cualquier elemento del circuito. Los DS 286 y 287 son fronteras con dos circuitos adyacentes de respaldo (backup feeders), denominados respectivamente BF1 y BF2.

C.2 Identificación del estado interrumpido

A continuación se exponen varios ejemplos de fallos en este circuito de ejemplo para ilustrar la utilidad de la metodología presentada en el apartado 3.3 para la identificación del estado de alimentación de un circuito ante la recepción de alertas. En los casos en los que quede identificado el estado interrumpido y el procedimiento descrito en el apartado 4.1 permita un primer avance en la delimitación de la sección que contiene el fallo, y por tanto reducir el SNS, se extiende la exposición a este resultado. Utilizando estructuras dispersas, en un ordenador con microprocesador 3.20-GHz, Intel Core™ i5-4460 los tiempos de ejecución del procedimiento de identificación del estado de alimentación resultan inferiores a 1 milisegundo.

Tabla C.1 Subconjuntos de nudos cuyo fallo es despejado por el mismo DP.

Conjunto	Clientes	CD (uds.)	Longitud de línea (km)	Fallos por año
$\mathcal{C}(1)$	63	12	12.69	2.55
$\mathcal{C}(13)$	62	12	12.11	2.34
$\mathcal{C}(36)$	286	20	11.95	2.30
$\mathcal{C}(110)$	3	1	0.06	0.01
$\mathcal{C}(158)$	21	1	0.72	0.15
$\mathcal{C}(162)$	1755	29	16.36	3.02
$\mathcal{C}(258)$	1	1	0.26	0.03
$\mathcal{C}(264)$	14	1	0.31	0.06

Para evitar relacionar extensas listas de nudos en la exposición de los casos, en lo sucesivo se denotará con $\mathcal{C}(i)$ al conjunto de nudos cuyo fallo es despejado por el DP i . Este conjunto está codificado por la fila i -ésima de la matriz C , definida en el apartado 3.2.1. La Tabla C.1 muestra para cada conjunto $\mathcal{C}(i)$ el número de clientes, el número de CD, la longitud de línea y el número de incidentes por



año calculados con tasas de fallo estadísticas referidas en [20]. Para una mejor visualización cada uno de estos conjuntos se muestra en la Figura C.2 con un color distinto y se destaca con el símbolo de un rayo rojo los elementos que corresponden a los elementos fallados en los casos descritos a continuación.

C.2.1 Casos de alerta por la recepción de señalización

Fallo permanente en 55

En caso de fallo en 55, el OSD recibirá señalización del DP 1 en cabecera del circuito, $\Pi = \{1\}$, y del DPF 179 cuando la GD 195 estuviese operativa, $\Delta_u = \{179\}$.

Si las reconexiones sucesivas del DP no son exitosas por persistencia del fallo, la señalización de actuación volverá a recibirse en cada intento por lo que la identificación del estado interrumpido se alcanza a través de la salida inferior del módulo de análisis de la señalización mostrado en la Figura 3.3. Se concluye que la interrupción ha sido causada por la actuación del DP 1 provocando la interrupción de todo el circuito, y el SNS se extiende a $\mathcal{C}(1)$ con una longitud de línea de 12.69 km.

Fallo permanente en 269

La única señalización recibida en este caso es la del DPF 179 con orientación de la corriente de falta aguas abajo, $\Delta_d = \{179\}$. A la entrada del procedimiento de identificación del estado de alimentación se determina con (3.2) que $\mathcal{T}_\Sigma = \{162, 258\}$. Puesto que ningún DP en \mathcal{T}_Σ tienen funcionalidad de reconexión en el módulo de análisis de la señalización no se satisface la expresión (3.3), concluyéndose el estado de alimentación interrumpido a través de su salida inferior. Nótese que en este caso se ha identificado el estado interrumpido sin llegar a determinar el DP que ha actuado y por tanto sin conocer la extensión de la interrupción. El SNS se extiende a todos los nudos aguas abajo del DPF 179, que por su ubicación permite comenzar la tarea de aislamiento y localización del fallo



habiendo descartado aproximadamente la mitad del trazado urbano.

Fallo espurio en 132

En este caso el OSD recibe señalización del DPF 179 con orientación de la falta aguas arriba, $\Delta_u = \{179\}$, sin que exista señalización desde el DP 1, $\Pi = \emptyset$, de lo que se determina que $\mathcal{T}_\Sigma = \{13,36,110,158,162,264\}$. Puesto que el DP 36 contenido en \mathcal{T}_Σ tiene funcionalidad de reconexión automática, se satisface la condición (3.3) a la entrada del módulo de análisis de la señalización del procedimiento de identificación del estado de alimentación.

La señalización inicial solo se recibe del DPF por la detección de la corriente de falta desde la GD 195, inicialmente en estado operativo. Al desconectarse la GD tras la falta inicial, no existirá SAFRA en ningún caso, si permanecen, o no, las condiciones del fallo. Esta circunstancia, considerada en el cumplimiento de (3.4), hace que no se pueda concluir si el estado de alimentación es normal por la reconexión exitosa de 36, como realmente ha sucedido al ser el fallo espurio, o si el estado es interrumpido por actuación permanente de uno de los dispositivos en \mathcal{T}_Σ . Por lo tanto, el OSD mantiene la incertidumbre sobre si se mantiene el suministro de todos los clientes en el circuito o si existe interrupción, que podría alcanzar hasta el 97% de los clientes del circuito en caso de que fuese 36 el DP abierto.

El estado de alimentación se resolverá en el módulo de consulta a clientes, ilustrado en la Figura 3.4, con $\mathcal{U} = \emptyset$. El primer CD seleccionado para consultar a sus clientes, según la expresión (3.6), será el contenido en $\mathcal{C}(264)$. Al confirmar los clientes consultados que se mantiene la alimentación de este CD, puede descartarse la actuación de cualquier DP aguas arriba, lo que se recoge en la actualización con la nueva información de $\mathcal{T}_\Sigma = \{13,110,158\}$. Hasta llegar a identificar el estado normal del circuito, se seguirán consultando a clientes. Los siguientes CD seleccionados serán: cualquiera de los contenidos en $\mathcal{C}(13)$, seguido de $\mathcal{C}(158)$ y finalmente de $\mathcal{C}(110)$. Con la verificación de que todos los clientes consultados mantienen su alimentación se concluirá que $\mathcal{T}_\Sigma = \emptyset$ y por tanto, a través de la salida derecha del módulo, que el estado de alimentación es normal.



Fallo permanente en 132

En este caso, a diferencia del anterior, el DP 36 habrá actuado tras cada intento de reconexión por permanencia de las condiciones de la falta, sin que el OSD reciba señalización posterior a la inicial. En la misma situación de partida, al consultar a los clientes alimentados desde el CD contenido en $\mathcal{C}(264)$, estos responderán que su suministro está interrumpido, con lo que se llega a $\mathcal{T}_{\Sigma} = \{36,162,264\}$. Confirmado el estado interrumpido, de la aplicación del procedimiento descrito en el apartado 4.1, el OSD consulta el estado de los clientes alimentados desde cualquier CD ubicado entre el DP 36 y el DP 162, los cuales confirman que permanecen interrumpidos. De esta manera se concluye que el DP 36 es el que ha actuado y que por tanto los 2077 clientes ubicados aguas abajo permanecen interrumpidos. Con toda la información disponible se determina que el SNS se extiende a la sección aguas abajo de 36, hasta 162 y 158.

C.2.2 Casos de alerta por reclamación de clientes

Para contemplar el caso de aparición de una falta sin que el OSD reciba señalización, asumimos que la GD 195 no está operativa (por ejemplo, de noche, si se tratase de generación fotovoltaica). Así, la ausencia de señalización sería compatible con la existencia de una falta provocada por el fallo de cualquier elemento no ubicado aguas abajo del DPF 179 y que hubiese sido despejada por cualquiera DP sin capacidad de señalización, $\{13,36,110,158,162,258,264\}$. Los siguientes casos corresponden a fallos permanentes.

Fallo en 26, con interrupción reclamada por cliente alimentado desde el CD 78

Al recibirse la reclamación de interrupción, el OSD comienza el procedimiento de identificación del estado de alimentación, con $\Delta_d = \Delta_u = \Pi = \emptyset$ y $\Lambda_{off} = \{78\}$, obteniendo con (3.2) que $\mathcal{T}_{\Sigma} = \{13\}$. Puesto que solo la actuación del DP 13 es compatible con la interrupción del CD 78 en ausencia de señalización, será necesario confirmar con otros clientes que hubieran sido afectados por la apertura de este DP. Cuando el OSD continúa el procedimiento entrando al módulo de



consulta a clientes con $\mathcal{U} = \emptyset$, se obtendrá de (3.6) la selección de cualquier CD contenido en $\mathcal{C}(13)$. De la consulta a los clientes alimentados desde estos CD se confirmará el estado interrumpido por actuación del DP 13 y, por tanto, el SNS se limitará a $\mathcal{C}(13)$.

Fallo en 233, con interrupción reclamada por cliente alimentado desde el CD 245

En este caso, en la entrada al módulo de consulta a clientes se tiene que $\mathcal{T}_\Sigma = \{36, 162\}$, por lo que de la expresión (3.6) se selecciona cualquier CD en $\mathcal{C}(162)$ para consultar a sus clientes. La respuesta que se obtenga de estos clientes confirmará el estado interrumpido, pero no servirá para conocer qué DP, entre los dos candidatos, es el que ha actuado, y por tanto la extensión de la interrupción. En este caso el SNS se extiende a $\mathcal{C}(36) \cup \mathcal{C}(162)$. Empleando el procedimiento descrito en 4.1 para identificar inequívocamente el DP que ha actuado despejando la falta, se consulta finalmente a clientes alimentados desde cualquier CD ubicado entre DP 36 y DP 162. Ante la respuesta de que mantienen su alimentación, se concluye que el DP que ha despejado la falta es 162 y el SNS queda reducido a $\mathcal{C}(162)$.

C.3 Aislamiento del fallo y reposición del suministro

Para ilustrar sobre este ejemplo la aplicación de la metodología propuesta en el capítulo 4 orientado a la delimitación y aislamiento de la sección que contiene el fallo y la reposición del suministro, partimos de la situación descrita en el apartado anterior ante el fallo permanente de 132 con recepción de señalización del DPF. En la situación inicial el OSD ha identificado el estado interrumpido en el circuito por el disparo permanente de DP 36 y ha llegado a determinar que el SNS se extiende a la sección aguas abajo de 36, hasta 162 y 158. En la Figura C.3 se resaltan los elementos contenidos en el SNS en color naranja y en color verde la sección de cabecera, que alimenta a 128 clientes aislados de la sección del fallo por 36. En esta situación inicial, queda interrumpido el suministro de 2077 clientes aguas abajo de 36, de los cuales 336 están alimentados desde la sección correspondiente al SNS y 1741 desde las secciones mostradas en color gris en la Figura C.3.



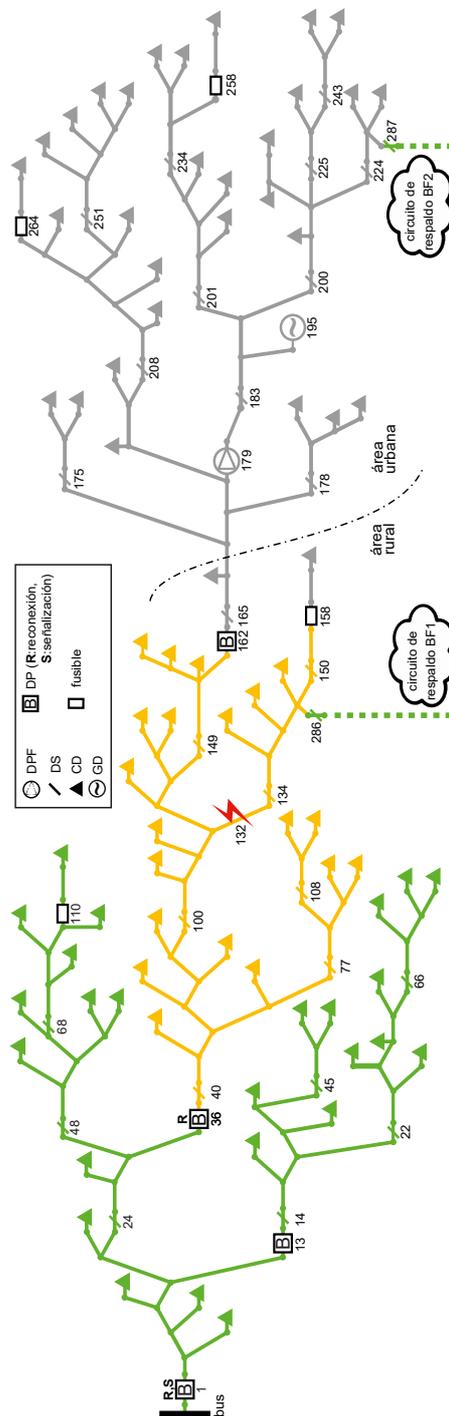


Figura C.3 Representación unifilar del ejemplo de red real. Detalle del SNS y sección de cabecera.



Para poder determinar la duración prevista de las actividades realizadas por los equipos de operarios, se consideran las siguientes suposiciones sobre su capacidad operativa:

- Se dispone de dos equipos de operarios, ambos inicialmente ubicados en 36.
- Uno de los equipos se mantiene en todo momento en la ubicación del DS que aísla la sección de cabecera y la sección del fallo. Este equipo se desplaza cuando la sección de cabecera se modifica.
- El otro equipo puede desplazarse para realizar maniobras en coordinación con el OSD.
- El DS en la cabecera del circuito dispone de actuación remota. Para el resto de dispositivos, cada actuación manual requiere de un tiempo de 0.1 horas.
- Se dispone de las coordenadas geográficas de los elementos que componen el circuito. En la figura C.4 se muestra el trazado real del circuito de ejemplo donde se destacan los índices de los DP y DS relevantes en la exposición del ejemplo. Los colores del trazado del circuito se corresponden a los descritos para la Figura C.3.
- En el área rural los equipos se desplazan a lo largo del trazado de la red a una velocidad de 60 km/h. En el área urbana los equipos se desplazan siguiendo caminos ortogonales entre las ubicaciones de los DS a una velocidad de 20 km/h. En las figuras C.3 y C.4 se muestra el límite entre las zonas rural y urbana por las que discurre el trazado del circuito.

En este ejemplo se escoge el número de suministros interrumpidos, independientemente de su demanda, para cuantificar la extensión de la interrupción $q(k)$. A partir de los parámetros de la Tabla C.2 y el número de clientes alimentados desde cada CD, las medidas asociadas en el instante inicial son $t_R(0) = 5.54$ horas, $q(0) = 2077$ clientes y $GII(0) = 11506$ horas-clientes.

Puesto que el tiempo hasta la restitución del estado normal medido es $t_R(0) =$



5.54 horas, el OSD tendrá en cuenta la demanda prevista de los suministros en las siguientes seis horas desde el instante inicial. Para esto, el OSD cuenta con la curva de demanda prevista de cada CD en este periodo previsto de seis horas, como se muestra en la figura C.5.

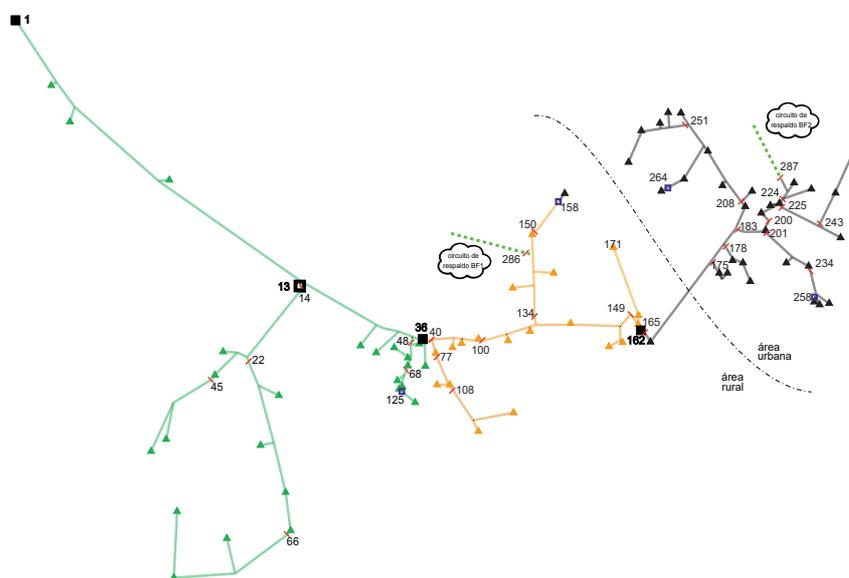


Figura C.4 Representación georreferenciada del circuito ejemplo de red real.

Tabla C.2 Parámetros del ejemplo con red real.

Elemento	Tasa de fallos	Tiempo de inspección	Tiempo de reparación
Línea Subterránea	0.106 fallos/km-año	0.62 horas/km	14.60 horas/fallo
Línea Aérea	0.053 fallos/km-año	0.224 horas/km	2.65 horas/fallo
Dispositivo de seccionamiento	0.001 fallos-año	0.1 horas	1.5 horas/fallo
Centros de distribución	0.13 fallos-año	0.1 horas	1.6 horas/fallo
Dispositivos de protección	0.002 fallos-año	0.1 horas	1.5 horas/fallo

Al igual que en el ejemplo de red de ejemplo tutorial presentado en el apéndice B.1, partiendo de la situación inicial del estado interrumpido, se distinguen dos escenarios diferenciados por la capacidad que el OSD considera disponible desde los dos circuitos adyacentes de respaldo, BF1 y BF2. En un primer escenario A, la capacidad de circuito adyacente BF1 es de 2000 kW, lo que resulta suficiente para alimentar a todos los clientes aguas abajo del DS 134 pero insuficiente para llegar a atender a la demanda aguas abajo del DS 100. La capacidad de BF2 es también



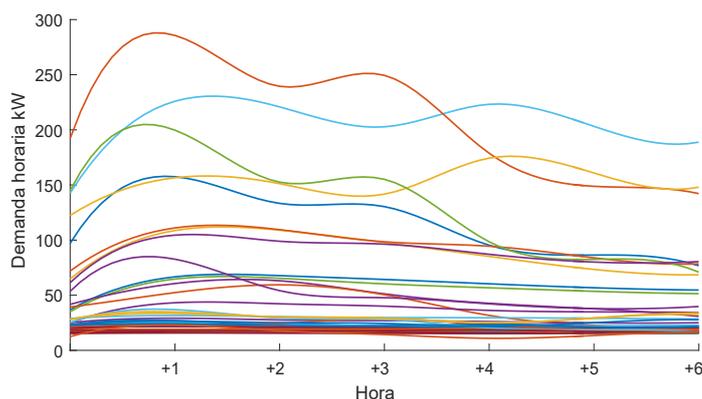


Figura C.5 Curva de demanda prevista de los CD del ejemplo de red real.

de 2000 kW, que igualmente es insuficiente para atender la demanda abajo del DS 100, pero suficiente para la demanda aguas abajo del DS 149.

En el escenario B, la capacidad desde BF1 es la misma que en el anterior, pero se reduce a 1600 kW la capacidad que el OSD determina como disponible de BF2, que resulta insuficiente para alimentar a los suministros aguas abajo del DS 149 e incluso a los que están aguas abajo del DS 165.

C.3.1 Escenario A

En la Tabla C.3 se presentan las ST seleccionadas en este escenario en la misma estructura expuesta para la Tabla B.2, obtenidas mediante el criterio de selección en un único paso descrito en 4.3.3 ante el fallo en cada sección aislable. El impacto total esperado de la interrupción obtenido es de 1426 horas·clientes (12.4% del impacto inicial). El planteamiento de las ST candidatas y su selección consumen un tiempo menor de 250 milisegundos en un ordenador con microprocesador 3.20-GHz, Intel Core™ i5-4460.

En la Tabla C.4, para el caso particular en que el fallo se encuentre en 132 (elemento contenido en $\mathcal{W}(100)$), se relacionan las ST consideradas como candidatas y seleccionadas en cada instante, en la misma estructura que se describió en el ejemplo de red simple en el apéndice B.2.



Tabla C.3 Red real, escenario A - Sucesión de ST seleccionadas en un solo paso.

Conjunto	Fallos año	Impacto total <i>horas-clientes</i>	ST
$\mathcal{W}(36)$	0.755	1298	3 : {165,287} 5 : {{100,36},{36,286}} 4 : {{77,36},{36,-}}
$\mathcal{W}(108)$	0.347	1175	3 : {165,287} 5 : {{100,36},{36,286}} 4 : {{77,36},{36,-}} 4 : {{108,77},{77,-}}
$\mathcal{W}(77)$	0.319	1228	3 : {165,287} 5 : {{100,36},{36,286}} 4 : {{77,36},{36,-}} 4 : {{108,77},{77,-}}
$\mathcal{W}(100)$	0.876	1741	3 : {165,287} 5 : {{100,36},{36,286}} 5 : {{134,100},{100,286}} 5 : {{149,100},{100,165}}
$\mathcal{W}(134)$	0.498	1354	3 : {165,287} 5 : {{100,36},{36,286}} 5 : {{134,100},{100,286}} 4 : {{150,134},{134,-}}
$\mathcal{W}(150)$	0.176	1187	3 : {165,287} 5 : {{100,36},{36,286}} 5 : {{134,100},{100,286}} 4 : {{150,134},{134,-}}
$\mathcal{W}(149)$	0.50	1520	3 : {165,287} 5 : {{100,36},{36,286}} 5 : {{134,100},{100,286}} 5 : {{149,100},{100,165}}

En la situación inicial, la demanda total prevista para el conjunto de CD ubicados aguas abajo del DS 100, alcanza un valor máximo de 2300 kW en la hora posterior al comienzo de las actividades. Considerando este valor máximo de demanda no es posible plantear en el instante inicial las PST {{100,36},{36,286}} y {{100,36},{36,287}} ya que en ningún caso sería posible la reposición de la sección de cola conseguida abriendo el DS 100.

La primera ST seleccionada, {165,287} es una DST de una duración de 0.43 horas que consigue aislar una sección de cola al abrir el DS 165 y reponer la alimentación de 1720 clientes desde BF2 al cerrar el DS frontera 287. Tras su realización, el número de clientes interrumpidos en $k = 1$ será $q(1)=357$ clientes y



el impacto de la interrupción se reduce a $GII(1)=1978$ horas·clientes.

Después de abrir el DS 165 en la primera ST, la PST $\{\{100,36\},\{36,286\}\}$ puede considerarse como candidata en $k = 1$ al existir suficiente capacidad desde BF1 para energizar la sección de cola en caso de resultado fallido (FO), lo que permitiría que 299 clientes fuesen repuestos desde BF1 y reducir el SNS a la sección del fallo anterior que queda aguas arriba del DS 100. Si se obtiene el resultado complementario, la sección de cabecera se ampliaría hasta 100, reponiendo el suministro a 58 clientes desde la cabecera del circuito. Este resultado exitoso (\overline{FO}), que se alcanzará con una probabilidad del 59%, llevaría a reducir el SNS a la sección del fallo anterior aguas abajo de 100. Esta PST resulta seleccionada al presentar un mayor beneficio, $STB(2,m)=939$ horas·clientes y tras su realización, puesto que el fallo se encuentra en 132, el resultado exitoso conseguirá $q(2)=299$ clientes, $t_R(2)=4.38$ horas y $GII(2)=1310$ horas·clientes.

Las siguientes ST seleccionadas son dos PST que con igual resultado fallido, concluyen con la reducción del SNS a la mínima sección aislable. La primera de estas, $\{\{134,100\},\{100,286\}\}$ concluye con la reposición del servicio de 88 clientes aguas abajo de 134 desde BF1, cerrando el DS 286. La última PST, $\{\{149,100\},\{100,165\}\}$, finaliza la etapa FDISR reponiendo el servicio de 80 clientes más cuando el DS 165, que se abrió en la primera ST, se cierra para ampliar la sección de cola energizada desde BF2. El procedimiento finaliza tras 1.88 horas desde su comienzo, con la reposición del suministro de todos los clientes, excepto los 131 contenidos en la sección del fallo aislada, que permanecerán interrumpidos hasta la finalización de la reparación, tiempo que se ha reducido en 2.23 horas, desde los $t_R(0)=5.54$ horas iniciales hasta $t_R(4)=3.31$ horas.

En la Figura C.6 se muestra la gráfica de GII correspondiente a las sucesivas ST seleccionadas en el caso descrito. Esta gráfica, presentada de forma genérica en la Figura 4.5, ilustra la reducción paso a paso en el impacto de la interrupción. El área azul, correspondiente al impacto total de la interrupción, asciende a 1741 horas·clientes, el 15.13% del valor inicial del índice (11506 horas·clientes).

El resultado obtenido siguiendo el procedimiento de selección con búsqueda en profundidad del mayor beneficio esperado presentado en el apartado 4.6.3, es el



Tabla C.4 Red real, escenario A, caso de fallo en 132 - ST candidatas y seleccionadas en un sólo paso.

k	regla:ST	GII(k,m) <i>horas-clientes</i>	STC(k,m) <i>horas-clientes</i>	STB(k,m) <i>horas-clientes</i>	$q(k)$ <i>clientes</i>	$t_R(k)$ <i>horas</i>	GII(k) <i>horas-clientes</i>
0					2077	5.54	11506
1	3 : {165,287}	1978	899	8630	357	5.54	1978
	3 : {183,287}	7944	899	2663			
	4 : {{77,36},{36,-}}	8065	596	2844			
	4 : {{100,36},{36,-}}	8187	537	2782			
	4 : {{108,36},{36,-}}	9711	634	1162			
	4 : {{134,36},{36,-}}	8364	660	2482			
	5 : {{134,36},{36,286}}	8012	861	2633			
	4 : {{149,36},{36,-}}	9686	732	1088			
	5 : {{149,36},{36,287}}	2037	1205	8264			
	4 : {{150,36},{36,-}}	10536	732	238			
2	4 : {{77,36},{36,-}}	1397	184	396	299	4.38	1310
	4 : {{100,36},{36,-}}	1283	163	532			
	5 : {{100,36},{36,286}}	856	183	939			
	4 : {{108,36},{36,-}}	1671	190	116			
	4 : {{134,36},{36,-}}	1473	171	333			
	5 : {{134,36},{36,286}}	1121	206	651			
	4 : {{149,36},{36,-}}	1555	161	261			
	5 : {{149,36},{36,165}}	1215	194	568			
4 : {{150,36},{36,-}}	1813	184	-19				
3	4 : {{134,100},{100,-}}	860	91	358	211	3.93	828
	5 : {{134,100},{100,286}}	629	120	562			
	4 : {{149,100},{100,-}}	909	112	290			
	5 : {{149,100},{100,165}}	683	147	480			
	4 : {{150,100},{100,-}}	1143	111	56			
4	4 : {{149,100},{100,-}}	542	77	209	131	3.31	433
	5 : {{149,100},{100,165}}	373	98	357			

mismo que el obtenido con el criterio de selección en un único paso mostrado en la Tabla C.3. En ambos casos, el impacto total esperado de la interrupción que se consigue es de 1426 horas-clientes (12.4% del impacto inicial).

C.3.2 Escenario B

En este escenario, el OSD ha determinado que la capacidad disponible desde el circuito adyacente BF2 es de 1600 kW, que resulta insuficiente para alimentar la demanda de 1888 kW de los suministros aguas abajo del DS 165. En esta situación,



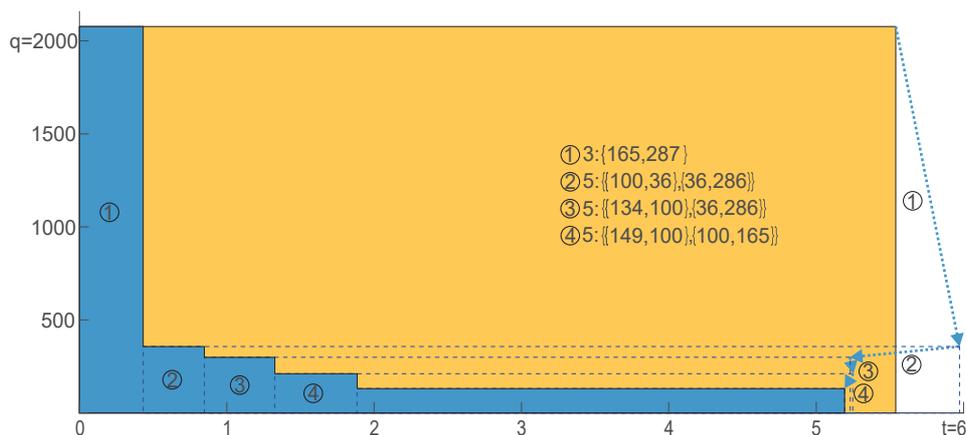


Figura C.6 Red real, escenario A, caso de fallo en 132 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso.

a diferencia del escenario anterior, no es viable considerar inicialmente como candidata a la DST $\{165,287\}$ ni la PST $\{\{149,36\},\{36,287\}\}$.

En la Tabla C.5 se presentan las sucesivas secuencias de maniobras seleccionadas para este escenario, obtenidas mediante el criterio de selección en un único paso descrito en el apartado 4.3.3, ante la ubicación del fallo en cada sección aislable. La inviabilidad de reponer inicialmente la sección sana aguas abajo del SNS implica que el impacto total esperado resulte ser de 3464 horas·clientes (30.1 % del impacto inicial), mayor que en conseguido en el escenario A.

Análogamente al caso anterior, en la Tabla C.6 se relacionan las ST consideradas como candidatas y seleccionadas en cada instante, para el caso particular en que el fallo se encuentre en 132.

En este caso, la primera secuencia seleccionada, $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$ es una PST considerada según la regla 4, que consigue el mayor beneficio esperado, impulsado por la probabilidad $\phi(1,m) = 0.192$ de obtener un resultado exitoso (\overline{FO}) correspondiente al caso en que el fallo estuviese contenido en la sección lateral aguas abajo del DS 77. En este caso se conseguiría la reposición del servicio de todos los clientes del circuito excepto los 23 clientes contenidos en la sección aislada con la PST y reducir el tiempo estimado de finalización de la incidencia a $t_R(1,m|\overline{FO})=3.02$ horas, lo que implica la cuantificación de un beneficio esperado de $STB(1,m|\overline{FO})=11008$ horas·clientes. Sin embargo, puesto que el fa-



Tabla C.5 Red real, escenario B - Sucesión de ST seleccionadas en un solo paso.

Conjunto	Fallos año	Impacto total <i>horas-clientes</i>	ST
$\mathcal{W}(36)$	0.755	3423	4 : $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$ 5 : $\{\{134,100\},\{100,286\}\}$ 3 : $\{183,287\}$ 5 : $\{\{100,36\},\{36,134\}\}$
$\mathcal{W}(108)$	0.347	456	4 : $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$ 4 : $\{\{108,77\},\{77,-\}\}$
$\mathcal{W}(77)$	0.319	509	4 : $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$ 4 : $\{\{108,77\},\{77,-\}\}$
$\mathcal{W}(100)$	0.876	5203	4 : $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$ 5 : $\{\{134,100\},\{100,286\}\}$ 3 : $\{183,287\}$ 5 : $\{\{100,36\},\{36,134\}\}$ 4 : $\{\{149,100\},\{100,-\}\}$ 3 : $\{208,183\}$
$\mathcal{W}(134)$	0.498	1385	4 : $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$ 5 : $\{\{134,100\},\{100,286\}\}$ 2 : $\{-,77\}$ 4 : $\{\{150,134\},\{134,-\}\}$
$\mathcal{W}(150)$	0.176	1218	4 : $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$ 5 : $\{\{134,100\},\{100,286\}\}$ 2 : $\{-,77\}$ 4 : $\{\{150,134\},\{134,-\}\}$
$\mathcal{W}(149)$	0.50	7307	4 : $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$ 5 : $\{\{134,100\},\{100,286\}\}$ 3 : $\{183,287\}$ 5 : $\{\{100,36\},\{36,134\}\}$ 4 : $\{\{149,100\},\{100,-\}\}$

llo se encuentra en el nudo 132, el resultado finalmente alcanzado será fallido (FO) sin que se consiga la reposición del suministro y, por tanto, llegándose a $q(1) = q(1,m|FO) = 2077$ clientes y $t_R(1) = t_R(1,m|FO) = 4.798$ horas. La duración de las actuaciones habrá sido de $d(1,m|FO) = 0.31$ horas por lo que se habrá conseguido un beneficio de $STB(1,m|FO) = 904$ horas·clientes para llegar a $GII(1) = 9966$ horas·clientes.

La segunda ST seleccionada es la PST $\{\{134,36\},\{36,286\}\}$ que considera el seccionamiento mediante el DS 134 de otra rama lateral de la sección que contiene el fallo. En caso de resultado fallido (FO) se conseguiría reponer el servicio de 88 clientes desde el circuito adyacente de respaldo BF2 al cerrar 287 con lo que



se conseguiría $q(2) = q(2,m|FO)=1989$ clientes y reducir el SNS de forma que $t_R(2) = t_R(2,m|FO)=4.236$ horas y $GII(2)=8425$ horas·clientes.

Al alcanzar el instante $k = 2$ cualquier seccionamiento del SNS se interpondrá en la energización desde la cabecera del circuito de los clientes aguas abajo del DS 165 y aun seguirá siendo inviable la reposición de las secciones de cola creadas desde los circuitos adyacentes de respaldo. En esta situación, la ST seleccionada resulta ser la DST $\{183,287\}$ que consigue la reposición del servicio de los 643 clientes aguas abajo de 183 desde BF2 cerrando el DS frontera 287. Estas actuaciones, de una duración de $d(3,m) = 0.42$ horas, consiguen el resultado previsto de $q(3)=1346$ clientes y $t_R(3) = t_R(2)=4.236$ horas, lo que implica que el impacto de la interrupción llegue a ser $GII(3)=5702$ horas·clientes.

El aislamiento de la sección aguas abajo del DS 183 permite ahora la consideración de la PST $\{\{100,36\},\{36,134\}\}$ que en caso de resultado fallido (FO) y tras el cierre del DS 134, previamente abierto en la segunda ST, permitirá extender la sección repuesta desde BF1. Este resultado llevaría a la reposición del suministro de 1288 clientes, $q(4,m_4|FO)=58$ clientes y el SNS se reduciría a los elementos aguas arriba de 100 con $t_R(4,m_4|FO)=2.5$ horas. Esta PST es seleccionada al tener el valor de STB más alto, $STB(4,m)=1666$ horas·clientes, obteniéndose tras su realización el resultado exitoso y consiguiéndose que $q(4)=1311$ clientes, $t_R(4)=3.93$ horas y $GII(4)=5147$ horas·clientes.

Al llegar a $k = 4$ solo puede plantearse como candidata la PST $\{\{149,36\},\{36,-\}\}$, que concluye con resultado fallido y la reducción del SNS a la mínima sección aislable que contiene el fallo, $t_R(5)=3.31$ horas, sin conseguir reponer el servicio a más clientes, con lo que $GII(5)=4337$ horas·clientes.

Al quedar abierto el DS 149 tras la última ST, en $k = 5$ se presenta la posibilidad de realizar la DST $\{208,183\}$ que permite reponer el suministro de 947 clientes más, al extender la reposición conseguida desde BF2 al suministro de los clientes aguas abajo del DS 149, deslastrando previamente la sección aguas abajo del DS 208 para cumplir las restricciones técnicas.

En el instante $k = 6$ se mantienen interrumpidos 131 clientes contenidos en la



sección de fallo aislada y 210 clientes aislados por la apertura de 208. También permanecen aislados 23 clientes aguas abajo de 77 tras la apertura de este DS en la primera ST realizada. Como puede observarse en la Tabla C.6, a partir de $k = 4$, una vez que queda cerrado 36, se considera como ST candidata la DST $\{-,77\}$ que cierra de nuevo 77 para reponer el servicio de los clientes aguas abajo desde la cabecera del circuito. El beneficio esperado de esta ST no resulta ser positivo, incluso cuando en $k = 6$ es la única opción considerada ya que el impacto de reponer el servicio a los 23 clientes aguas abajo de 77 no compensa el retraso ocasionado a la interrupción del resto de clientes afectados. Sin más ST que realizar, se concluye con $q(6)=364$ clientes, $t_R(6)=3.31$ y $GII(2)=1204$ horas·clientes.

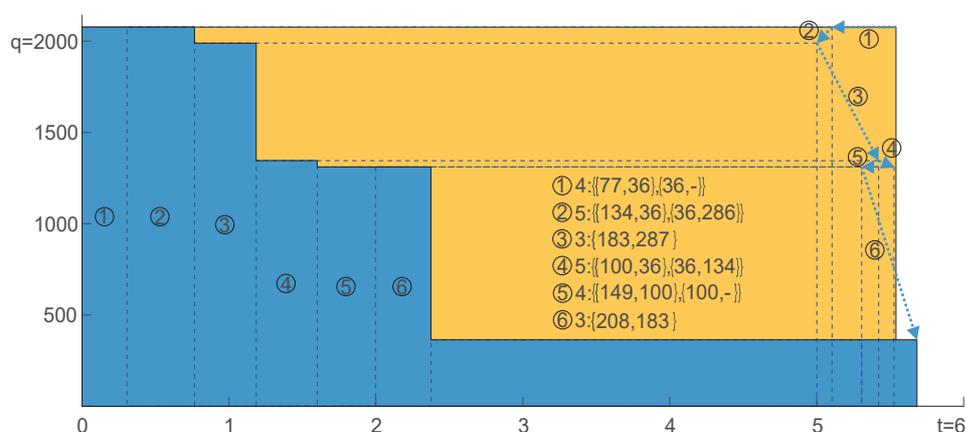


Figura C.7 Red real, escenario B, caso de fallo en 132 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso.

La duración total de todas las secuencias de maniobra habrá sido de 2.37 horas, las cuales concluyen con la reposición del servicio de todos los clientes excepto los 364 suministros descritos anteriormente. Estos clientes permanecerán interrumpidos hasta la finalización de la reparación, que se ha reducido, al igual que en el caso anterior, en 2.23 horas, desde $t_R(0)=5.54$ horas iniciales hasta $t_R(6)=3.31$. En la Figura C.7 se observa el área azul correspondiente al impacto total de la interrupción tras la realización de las ST seleccionadas que asciende a 5203 horas·clientes, un 45.2% del impacto inicial.

Los 210 clientes alimentados aguas abajo del DS 208, como se ha descrito



Tabla C.6 Red real, escenario B, caso de fallo en 132 - ST candidatas y seleccionadas en un sólo paso.

k	regla:ST	GII(k,m)	STC(k,m)	STB(k,m)	q(k)	$t_R(k)$	GII(k)
		horas-clientes	horas-clientes	horas-clientes	clientes	horas	horas-clientes
0					2077	5.54	11506
1	3 : {183,287}	7944	899	2663	2077	4.78	9966
	3 : {200,287}	8216	899	2392			
	4 : {{77,36},{36,-}}	8065	596	2844			
	4 : {{100,36},{36,-}}	8187	537	2782			
	4 : {{108,36},{36,-}}	9711	634	1162			
	4 : {{134,36},{36,-}}	8364	660	2482			
	5 : {{134,36},{36,286}}	8012	861	2633			
	4 : {{149,36},{36,-}}	9686	732	1088			
4 : {{150,36},{36,-}}	10536	732	238				
2	3 : {183,287}	6880	902	2184	1989	4.24	8425
	3 : {200,287}	7116	902	1948			
	4 : {{100,36},{36,-}}	7937	511	1518			
	4 : {{134,36},{36,-}}	6750	653	2562			
	5 : {{134,36},{36,286}}	6467	843	2655			
	4 : {{149,36},{36,-}}	8214	727	1024			
4 : {{150,36},{36,-}}	8940	732	293				
3	3 : {183,287}	5702	836	1888	1346	4.24	5702
	3 : {200,287}	5909	836	1680			
	4 : {{100,36},{36,-}}	6716	547	1162			
	4 : {{149,36},{36,-}}	6927	658	841			
4	4 : {{100,36},{36,-}}	4516	606	579	1311	3.93	5147
	5 : {{100,36},{36,134}}	3372	663	1666			
	4 : {{149,36},{36,-}}	4646	596	460			
5	2 : {-,77}	5056	156	-65	1311	3.31	4337
	4 : {{149,36},{36,-}}	4190	474	482			
6	2 : {-,77}	4261	156	-80	364	3.31	1204
	3 : {208,183}	1204	494	2639			
7	2 : {-,77}	1128	91	-15			

anteriormente, permanecen interrumpidos ya que la capacidad disponible desde BF2 de 1600 kW es insuficiente para atender a la demanda prevista aguas abajo del DS 165, de 1888 kW. Esta demanda prevista en el estado inicial por el OSD atiende a la situación más restrictiva en el periodo de tiempo que se prevé que dure el estado de operación modificado, en este caso, correspondiente a la siguiente hora tras el comienzo de la tarea de aislamiento del fallo y reposición del suministro, como puede observarse en la Figura C.5.



Sin embargo, en la cuarta hora tras el estado inicial, el OSD considera que la demanda aguas abajo 165 se reducirá lo suficiente como para que sea posible incorporar los clientes aguas abajo 208 a la sección energizada desde BF2. Como se refirió en el apartado 4.6.5, retomando el procedimiento en $k = 6$ con esta nueva demanda prevista, resulta seleccionada la DST $\{-,208\}$ que cierra el DS 208 para reponer los 210 suministros que tiene aguas abajo desde BF2.

En la Figura C.8 se muestra la gráfica GII en la que, en un color naranja más claro, se destaca la reducción en el impacto total que supone realizar esta última DST, etiquetada con el número 7, en la cuarta hora tras el comienzo de las actuaciones de maniobra. Se consigue que los 210 suministros repuestos reduzcan 1.68 horas su interrupción resultando el impacto total de 4849 horas-clientes (42.1 % del impacto inicial).

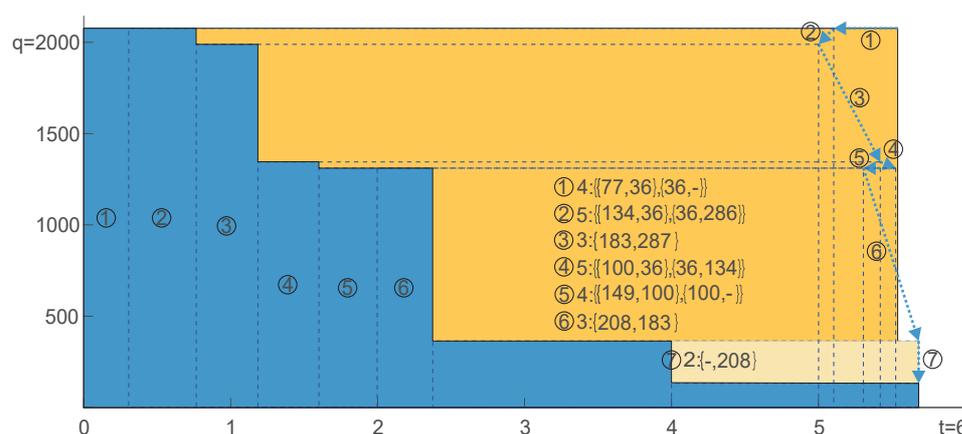


Figura C.8 Red real, escenario B, caso de fallo en 132 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso y realización aplazada.

Para este mismo caso, la modificación del procedimiento de selección de secuencias de maniobras mediante búsqueda en profundidad del mayor beneficio esperado junto con la modificación del conjunto de reglas heurísticas propuesta en el apartado 4.6.4, produce una mejora sustancial del impacto total esperado. En la Tabla C.7 se muestran las sucesivas ST seleccionadas con este procedimiento modificado, considerando un nivel de profundidad máximo de $k_{max} = 4$. El impacto total esperado con este procedimiento más exhaustivo resulta ser de 2455



horas-clientes (21.3% del impacto inicial) frente a las 3464 horas-clientes (30.1% del impacto inicial) conseguidos con el criterio de selección en un único paso.

Tabla C.7 Red real, escenario B - Sucesión de ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad y modificación del conjunto de reglas heurísticas.

Conjunto	Fallos año	Impacto total <i>horas-clientes</i>	ST
$\mathcal{W}(36)$	0.755	2027	4 : $\{\{100,36\},\{36,-\}\}$ 3 : $\{183,286\}$ 2 : $\{-,287\}$ 4 : $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$
$\mathcal{W}(108)$	0.347	1904	4 : $\{\{100,36\},\{36,-\}\}$ 3 : $\{183,286\}$ 2 : $\{-,287\}$ 4 : $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$ 4 : $\{\{108,77\},\{77,-\}\}$
$\mathcal{W}(77)$	0.319	1957	4 : $\{\{100,36\},\{36,-\}\}$ 3 : $\{183,286\}$ 2 : $\{-,287\}$ 4 : $\{\{77,36\},\{36,-\}\}$ 4 : $\{\{108,77\},\{77,-\}\}$
$\mathcal{W}(100)$	0.876	3705	4 : $\{\{100,36\},\{36,-\}\}$ 4 : $\{\{134,100\},\{100,-\}\}$ 0 : $\{165,-\}$ 3 : $\{208,287\}$ 4 : $\{\{149,100\},\{100,-\}\}$ 2 : $\{-,286\}$ 2 : $\{-,165\}$
$\mathcal{W}(134)$	0.498	1170	4 : $\{\{100,36\},\{36,-\}\}$ 4 : $\{\{134,100\},\{100,-\}\}$ 4 : $\{\{150,134\},\{134,-\}\}$
$\mathcal{W}(150)$	0.176	1003	4 : $\{\{100,36\},\{36,-\}\}$ 4 : $\{\{134,100\},\{100,-\}\}$ 4 : $\{\{150,134\},\{134,-\}\}$
$\mathcal{W}(149)$	0.50	3399	4 : $\{\{100,36\},\{36,-\}\}$ 4 : $\{\{134,100\},\{100,-\}\}$ 0 : $\{165,-\}$ 3 : $\{208,287\}$ 4 : $\{\{149,100\},\{100,-\}\}$ 2 : $\{-,134\}$

En la Tabla C.8 se relacionan las ST seleccionadas con este procedimiento en el caso particular de que el fallo se encuentre en 132. En la gráfica GII de la Figura



C.9 se ilustran estas secuencias, destacándose en un tono más claro sobre el área de color naranja la reducción del impacto de la interrupción conseguida con este procedimiento, 3705 horas·clientes, respecto al de las ST realizadas con el método de selección en un solo paso, 5203 horas·clientes. Nótese que en este caso, la

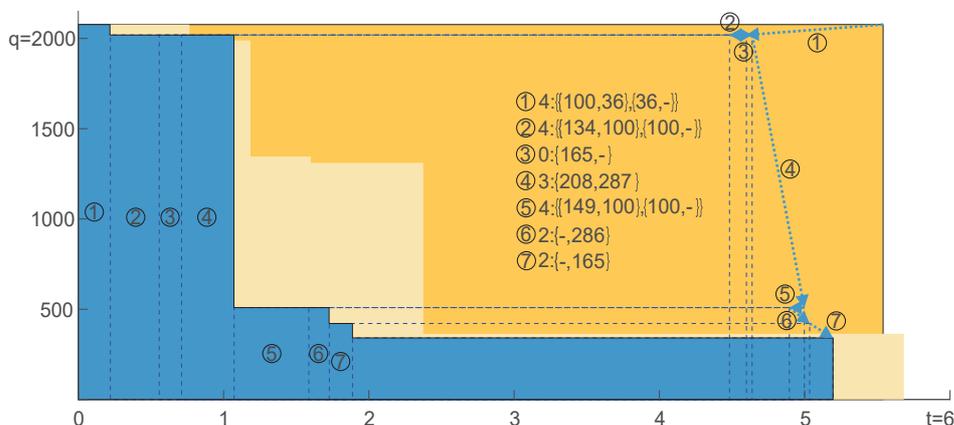


Figura C.9 Red real, escenario B, caso de fallo en 132 - Gráfica GII de las ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad y modificación del conjunto de reglas heurísticas.

tercera ST seleccionada, $\{165, -\}$, corresponde a la nueva regla 0 introducida en el apartado 4.6.4. Esta ST permite aislar la sección sana aguas abajo del SNS, posibilitando que la siguiente DST seleccionada, $\{208, 287\}$, consiga la reposición desde BF2 de los suministros aguas abajo del DS 165 excepto los deslastrados por la apertura de 208 para cumplir las restricciones técnicas.

Tabla C.8 Red real, escenario B, fallo en 132 - Secuencias de maniobras seleccionadas mediante búsqueda en profundidad y modificación del conjunto de reglas heurísticas.

k	regla:ST	q(k) clientes	t _R (k) horas	GII(k) horas·clientes
0		2077	5.54	11506
1	4 : {{100,36},{36,-}}	2019	4.38	8845
2	4 : {{134,100},{100,-}}	2019	3.93	7926
3	0 : {165,-}	2019	3.93	7926
4	3 : {208,287}	509	3.93	1998
5	4 : {{149,100},{100,-}}	509	3.31	1684
6	2 : {-,286}	421	3.31	1393
7	2 : {-,165}	341	3.31	1128



ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

Notación

Siglas y acrónimos

CD	Centro de distribución
DP	Dispositivo de protección
DPF	Detector de paso de falta
DS	Dispositivo de seccionamiento
DST	Secuencia de maniobras determinista (Deterministic switching task)
FDISR	Detección del fallo, aislamiento y reposición del suministro (Fault detection, isolation and service restoration)
GD	Generación distribuida
GII	Impacto generalizado de una interrupción (Generalized Interruption Impact)
OSD	Operador del Sistema de distribución
PST	Secuencia de maniobras probabilística (Probabilistic switching task)
SADRA	Señalización tras un intento retardado de reconexión (Signaling After a Delayed Reclosing Attempt)
SAFRA	Señalización tras un intento rápido de reconexión (Signaling After a Fast Reclosing Attempt)
SNS	Conjunto de nudos sospechosos (Suspicious node set)



ST	Secuencia de maniobras (Switching task)
STB	Beneficio de una secuencia de maniobras (Switching task benefit)
STC	Coste de una secuencia de maniobras (Switching task cost)

Información estática

G	Grafo funcional de un circuito radial MT
\mathcal{N}	Conjunto de nudos de un grafo funcional (G), que comprende cinco categorías de componentes, $\{\mathcal{P}, \mathcal{D}, \mathcal{G}, \mathcal{L}, \mathcal{W}, \mathcal{Z}\}$
\mathcal{P}	Subconjunto de \mathcal{N} con funcionalidad de protección
\mathcal{P}_s	Subconjunto of \mathcal{P} con capacidad de señalización
\mathcal{P}_r	Subconjunto of \mathcal{P} con capacidad de reconexión
\mathcal{D}	Subconjunto de \mathcal{N} con funcionalidad de detección de paso de falta
\mathcal{D}_o	Subconjunto of \mathcal{D} con capacidad de señalización direccional
\mathcal{G}	Subconjunto de \mathcal{N} correspondiente a la generación distribuida
\mathcal{L}	Subconjunto de \mathcal{N} correspondiente a centros de distribución
\mathcal{W}	Subconjunto de \mathcal{N} correspondiente a dispositivos de seccionamiento
\mathcal{Y}	Subconjunto de \mathcal{W} de los dispositivos frontera con circuitos adyacentes
\mathcal{Z}	Subconjunto de \mathcal{N} correspondiente a línea eléctrica



Los vectores columna binarios $N, P, P_s, P_r, D, D_o, G, L, W, Y$, y Z codifican a los respectivos conjuntos con fuente caligráfica $\mathcal{N}, \mathcal{P}, \mathcal{P}_s, \mathcal{P}_r, \mathcal{D}, \mathcal{D}_o, \mathcal{G}, \mathcal{L}, \mathcal{W}, \mathcal{Y}$ y \mathcal{Z} ,

Información dinámica

Π	Conjunto de señales de actuación recibidas desde los dispositivos en \mathcal{P}_s
Δ_d	Conjunto de señales recibidas desde los dispositivos en \mathcal{D} con orientación aguas abajo
Δ_u	Conjunto de señales recibidas desde los dispositivos en \mathcal{D} con orientación aguas arriba
Λ_{off}	Subconjunto de \mathcal{L} para los que se conoce su interrupción de la alimentación
Λ_{on}	Subconjunto de \mathcal{L} para los que se conoce que mantienen su alimentación.
Σ	Conjunto de todas las señales recibidas por el OSD, $\{\Pi, \Delta_d, \Delta_u, \Lambda_{off}, \Lambda_{on}\}$

Los vectores columna binarios $\Pi, \Delta_d, \Delta_u, \Lambda_{off}$ y Λ_{on} codifican los respectivos conjuntos $\Pi, \Delta_d, \Delta_u, \Lambda_{off}$ y Λ_{on} .

Conjuntos

\mathcal{F}_x	Subconjunto (SNS) de \mathcal{N} cuyo fallo es compatible con la información dinámica disponible $x \in \Sigma$
\mathcal{T}_x	Subconjunto de \mathcal{P} cuya actuación es compatible con información dinámica $x \in \Sigma$



\mathcal{U}	Subconjunto de \mathcal{P} cuya actuación no es compatible con la información dinámica recibida
$\mathcal{F}(k)$	Subconjunto de \mathcal{F}_x correspondiente a la sección de red que contiene el fallo que ha llegado a ser delimitado en el instante k
$\mathcal{O}(k)$	Subconjunto de \mathcal{W} con estado abierto en el instante k
$\mathcal{B}(k)$	Subconjunto de \mathcal{N} no energizados en el instante k

Los vectores columna binarios $F_x, T_x, U, F(k), O(k), B(k)$, codifican los respectivos conjuntos $\mathcal{F}_x, \mathcal{T}_x, \mathcal{U}, \mathcal{F}(k), \mathcal{O}(k)$ y $\mathcal{B}(k)$

Parámetros

r	Vector con las tasas de fallo esperadas de los componentes correspondientes a los nudos en \mathcal{N}
$cust$	Vector de número de clientes. $[cust]_i > 0$ cuando $[L]_i = 1$.
$demand$	Vector de potencias demandadas por los clientes. $[demand]_i > 0$ cuando $[L]_i = 1$.
$length$	Vector de longitudes de tramo línea. $[length]_i > 0$ cuando $[Z]_i = 1$.
T_{search}	Vector con las duraciones características de inspección del fallo en los componentes correspondientes a los nudos en \mathcal{N}
T_{travel}	Matriz con las duraciones de los desplazamientos entre nudos en \mathcal{N}
T_{repair}	Vector con las duraciones características de reparación del fallo en los componentes correspondientes a los nudos en \mathcal{N}
p_N	Vector con las demandas previstas de las cargas alimentadas desde cada nudo en \mathcal{N}
p_Y	Vector con la capacidades disponibles desde circuitos adyacentes en cada nudo en \mathcal{Y}



Funciones, matrices y operadores

I	matriz identidad
S	Matriz de sucesores de un grafo \mathbf{G}
C	Matriz booleana que relaciona cada nudo en \mathcal{N} (columnas) con el DP en \mathcal{P} (filas) que despejaría la falta producida por el componente correspondiente al nudo
$FS(k)$	Matriz booleana que relaciona los nudos de $\mathcal{F}(k)$ (columnas) que es necesario inspeccionar antes de encontrar el fallo en cada nudo en $\mathcal{F}(k)$ (filas).
$BS(k)$	Matriz booleana que contiene información sobre los desplazamientos, adicionales a los implicados en la inspección, que son requeridos cuando se recorren los nudos en $\mathcal{F}(k)$ en la tarea de localización del fallo.
nnz	Función de devuelve el número de elementos no nulos de un vector (similar a la función homónima de Matlab)
$diag$	Función que a partir de un vector devuelve una matriz diagonal con los elementos del vector (similar a la función homónima de Matlab)
\circ	Operador del producto Hadamard de matrices (término a término)
\oslash	Operador de la división Hadamard de matrices (término a término)
\vee	Operador lógico disyunción (or) de matrices (término a término)
\oplus	Operador lógico disyunción exclusiva (exclusive or, xor) de matrices (término a término)
\setminus	Símbolo para la operación de diferencia de dos conjuntos
$[A]_{ix}$	Vector fila i -ésima de una matriz A
$[A]_{xi}$	Vector columna i -ésima de una matriz A



ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

Índice de Figuras

2.1	Representación unifilar del circuito de ejemplo	19
2.2	Grafo funcional de 25 nudos del circuito de ejemplo	20
2.3	Matriz de sucesores S del grafo funcional del circuito de ejemplo	23
3.1	Matriz de sucesores S del grafo funcional del circuito de ejemplo destacando los términos no nulos de la matriz C	32
3.2	Procedimiento para la identificación del estado interrumpido	37
3.3	Módulo de análisis de la señalización	39
3.4	Módulo de consulta a clientes	42
3.5	Representación unifilar del circuito de ejemplo	45
3.6	Módulo de análisis de la señalización modificado	53
4.1	Procedimiento de selección de CD para consultar a clientes	61
4.2	Ejemplo ilustrativo de las secciones de un circuito	67
4.3	Metodología propuesta para la selección de actuaciones de maniobra	70
4.4	Representación del beneficio esperado de una ST	73
4.5	Ejemplo de gráfica GII	86
4.6	Representación unifilar de un circuito con bucle abierto	89
4.7	Grafo funcional del circuito ilustrado en la Figura 4.6	89
4.8	Ejemplo ilustrativo	95



4.9	Árbol de avance del ejemplo ilustrativo	96
A.1	Ejemplo de árbol radial de 10 nudos	113
A.2	Matrices de adyacencia (M), de incidencia (A) y de sucesores (S) del árbol ejemplo de 10 nudos	113
A.3	Componentes fila de la matriz S del ejemplo de 10 nudos	114
A.4	Componentes columna de la matriz S del ejemplo de 10 nudos	115
A.5	Ejemplo de identificación de árboles contenidos en el ejemplo de 10 nudos, determinados por $\mathcal{X} = \{1,2,3\}$	118
A.6	Representación de la reorientación del ejemplo de 10 nudos desde el nudo 6	120
A.7	Matriz de sucesores $S^{[6]}$ en el ejemplo de 10 nudos	121
A.8	Recorrido en profundidad en el ejemplo de 10 nudos	122
A.9	Matriz de sucesores S^d de la secuencia de recorrido en el ejemplo de 10 nudos	122
A.10	Estructuras matriciales relacionadas con el cálculo de S^d en el ejemplo de 10 nudos	125
A.11	Matrices $FS(k)$ y $BS(k)$ en el ejemplo de 10 nudos	126
B.1	Representación unifilar del ejemplo de red simple	127
B.2	Red simple, escenario A, caso de fallo en 2 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso	131
B.3	Red simple, escenario B, caso de fallo en 2 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso	134
B.4	Red simple, escenario B, caso de fallo en 10 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso	135
B.5	Árbol de decisiones correspondiente al escenario A	136
B.6	Red simple, escenario A, caso de fallo en 2 - Gráfica GII de las ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad	138
C.1	Visualización de la matriz S del grafo funcional (287 nudos) del circuito de ejemplo	142
C.2	Representación unifilar del ejemplo de red real	143
C.3	Representación unifilar del ejemplo de red real. Detalle del SNS y sección de cabecera	149
C.4	Representación georreferenciada del circuito ejemplo de red real	151



C.5	Curva de demanda prevista de los CD del ejemplo de red real	152
C.6	Red real, escenario A, caso de fallo en 132 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso	156
C.7	Red real, escenario B, caso de fallo en 132 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso	159
C.8	Red real, escenario B, caso de fallo en 132 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso y realización aplazada	161
C.9	Red real, escenario B, caso de fallo en 132 - Gráfica GII de las ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad y modificación del conjunto de reglas heurísticas	163



ÁMBITO- PREFIJO

GEISER

Nº registro

00008745e2000046100

CSV

GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN

<https://sede.administracionespublicas.gob.es/valida>

FECHA Y HORA DEL DOCUMENTO

30/09/2020 09:02:42 Horario peninsular



GEISER-72ae-3190-62e0-4245-b278-daaaf-b94f-d960

Índice de Tablas

2.1	Subconjuntos de \mathcal{N} en el circuito de ejemplo	21
3.1	Nudos implicados en cada posible fallo	33
3.2	Conocimiento generado de la señalización de DP y DPF	36
3.3	Casos de ejemplo de alerta por señalización	45
3.4	Casos de ejemplo de alerta por reclamación de clientes	47
4.1	Estado de alimentación identificado y conjunto de nudos sospechosos ante la recepción de señalización. Caso ejemplo modificado	62
4.2	Reducción del SNS mediante consulta a clientes	62
B.1	Red simple, escenario A, caso de fallo en 2 - ST candidatas y seleccionadas en un solo paso	129
B.2	Red simple, escenario A - Sucesión de ST seleccionadas en un solo paso	132
B.3	Red simple, escenario B, caso de fallo en 2 - ST candidatas y seleccionadas en un solo paso	133
B.4	Red simple, escenario B - Sucesión de ST seleccionadas en un solo paso	134
B.5	Red simple, escenario B, caso de fallo en 10 - Gráfica GII de las ST seleccionadas en un solo paso	135



B.6	Red simple, escenario A, caso de fallo en 2 - ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad	137
B.7	Red simple, escenario A - Sucesión de ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad	139
B.8	Red simple, escenario B - Sucesión de ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad	140
C.1	Subconjuntos de nudos cuyo fallo es despejado por el mismo DP	144
C.2	Parámetros del ejemplo con red real	151
C.3	Red real, escenario A - Sucesión de ST seleccionadas en un solo paso	153
C.4	Red real, escenario A, caso de fallo en 132 - ST candidatas y seleccionadas en un sólo paso	155
C.5	Red real, escenario B - Sucesión de ST seleccionadas en un solo paso	157
C.6	Red real, escenario B, caso de fallo en 132 - ST candidatas y seleccionadas en un sólo paso	160
C.7	Red real, escenario B - Sucesión de ST seleccionadas mediante búsqueda en profundidad y modificación del conjunto de reglas heurísticas	162
C.8	Red real, escenario B, fallo en 132 - Secuencias de maniobras seleccionadas mediante búsqueda en profundidad y modificación del conjunto de reglas heurísticas	163



Bibliografía

- [1] A. Sumper, A. Sudrià, R. Ramirez, R. Villafáfila, and Mircea Chindris. Índices de continuidad en redes de distribución y su mejora. In *9º Congreso HISPANO LUSO Ingeniería Eléctrica (9CHLIE)*, 2005.
- [2] J. R. Redmon. Traditional versus automated approaches to reliability. In *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, volume 1, pages 739–742 vol.1, July 2001.
- [3] D. A. Kowalewski. A comparable method for benchmarking the reliability performance of electric utilities. In *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, volume 2, pages 646–649 vol.2, July 2002.
- [4] Z. G. Todd. A probability method for transmission and distribution outage calculations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83(7):695–701, 1964.
- [5] D. P. Gaver, F. E. Montmeat, and A. D. Patton. Power system reliability i-measures of reliability and methods of calculation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83(7):727–737, 1964.
- [6] J.D. Bouford. The need to segment abnormal events from the calculation of reliability indices. *IEEE Full Use Guide for Electric Distribution Reliability*



- Indices, IEEE Standard*, 2001.
- [7] R. D. Christie. Statistical methods of classifying major event days in distribution systems. In *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, volume 2, pages 639–642 vol.2, July 2002.
- [8] D. P. Ross, G. V. Welch, and H. L. Willis. Sensitivity of system reliability to component aging in metropolitan, urban, and rural areas. In *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)*, volume 2, pages 749–753 vol.2, Nov 2001.
- [9] Richard E. Brown. *Electric Power Distribution Reliability*. ABB Inc. Raleigh, North Carolina, 2002.
- [10] E. N. Dialynas and M. P. Papadopoulos. Reliability assessment studies in distribution network operation and planning. In *10th International Conference on Electricity Distribution, Nat. Tech. Univ., Athens, CIRED 1989*, pages 568–572 vol.6, May 1989.
- [11] A M Makinen, Jarmo Partanen, Erkki Lakervi, and Kari T Koivuranta. A practical approach for reliability evaluation of distribution networks. In *10th International Conference on Electricity Distribution, Tampere Univ. of Technol., CIRED 1989*, 1989.
- [12] A. Barabadi. Reliability model selection and validation using weibull probability plot - a case study. *Electric Power Systems Research, Elsevier*, 2013.
- [13] D.J. Smith. *Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers*. Elsevier, 2011.
- [14] M.M. Saha, J. Izykowski, and E. Rosolowski. Fault location on power networks. *Springer-Verlag London Limited, London*, 2009.



- [15] W.H. Kersting. System modeling and analysis. *CRC Press, Taylor&Francis Group, Boca Raton, FL, USA*, Jul 2000.
- [16] S. Asgarpour and M. J. Mathine. Reliability evaluation of distribution systems with nonexponential down times. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(2):579–584, 1997.
- [17] A. M. L. da Silva, A. M. Cassula, L. C. Resende, R. M. Almeida, M. T. Yamasaki, and G. M. F. Paula. Reliability evaluation of distribution systems considering automatic reclosers. In *2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, pages 100–105, Sep. 2004.
- [18] R. E. Brown, S. Gupta, R. D. Christie, S. S. Venkata, and R. Fletcher. Distribution system reliability assessment using hierarchical markov modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(4):1929–1934, Oct 1996.
- [19] Ricardo Baeza, G José, Rodríguez Juan, and L Hernández. Evaluación de confiabilidad de sistemas de distribución eléctrica en desregulación. 11:33–39, 06 2003.
- [20] J. A. Rosendo, A. Gómez, J. L. Martínez, G. Tévar, and M. Rodríguez. Inca: A tool for the assessment and improvement of supply reliability indices. In *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, pages 1–5, Oct 2007.
- [21] B. Kraniak and D. Ammons. Linking the future to the past: closing the loop between yesterday’s failures and tomorrow’s solutions. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2001 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No.01CH37179)*, pages 103–109, Jan 2001.
- [22] J. A. García Conejo, G. Tévar Bartolomé, A. Gómez Expósito, and M. Rodríguez Montañés. Aneto: A system for the automatic generation of theoretical network models. In *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, pages 1–6, Oct 2007.



- [23] A. Chowdhury and D. Koval. *Power Distribution System Reliability: Practical Methods and Applications*. Wiley-IEEE Press, 2009.
- [24] J. A. Rosendo, A. Gómez-Expósito, G. Tévar, and M. Rodríguez. Evaluation and improvement of supply reliability indices for distribution networks. In *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pages 1–6, April 2008.
- [25] P. Sritakaew, A. Sangswang, and K. Kirtikara. On the reliability improvement of distribution systems using pv grid-connected system. *ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications Vol.5, No.1*, 2007.
- [26] A. Zidan and E. F. El-Saadany. A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3):1525–1539, Sept 2012.
- [27] T. Nagata and H. Sasaki. An efficient algorithm for distribution network restoration. In *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, volume 1, pages 54–59 vol.1, July 2001.
- [28] H. Zhenga, Y. Chenga, B. Goub, D. Frankc, A. Bernc, and W.E. Mustonc. Impact of automatic switches on power distribution system reliability. *Electric Power Systems Research. Elsevier*, Oct 2011.
- [29] N. Balijepalli, S.S. Venkata, and R.D. Christie. Modeling and analysis of distribution reliability indices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19, Oct 2004.
- [30] L. T. Marques, A. C. B. Delbem, and J. B. A. London. Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(3):2359–2370, May 2018.
- [31] J. Casazza and F. Delea. *Understanding Electric Power Systems. An Overview of the Technology, the Marketplace, and Government Regulation*. Wiley-IEEE Press, 2003.



- [32] I. Waseem, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman. Reliability benefits of distributed generation as a backup source. *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, 2009.
- [33] P.M. Costa and M.A. Matos. Assessing the contribution of microgrids to the reliability of distribution networks. *Electric Power Systems Research, Elsevier*, 2008.
- [34] Jing Ma, Wei Ma, Dong Xu, Yang Qiu, and Zengping Wang. A power restoration strategy for the distribution network based on the weighted ideal point method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63:1030 – 1038, 2014.
- [35] Hanbing Qu and Yutian Liu. Maximizing restorable load amount for specific substation during system restoration. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1):1213 – 1220, 2012.
- [36] X. Huang, Y. Yang, and G. A. Taylor. Service restoration of distribution systems under distributed generation scenarios. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2(3):43–50, Sept 2016.
- [37] M. R. Kleinberg, K. Miu, and H. Chiang. Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(3):1110–1117, Aug 2011.
- [38] A. Arif, S. Ma, Z. Wang, J. Wang, S. M. Ryan, and C. Chen. Optimizing service restoration in distribution systems with uncertain repair time and demand. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6):6828–6838, Nov 2018.
- [39] S. Dimitrijevic and N. Rajakovic. Service restoration of distribution networks considering switching operation costs and actual status of the switching equipment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(3):1227–1232, May 2015.
- [40] S.P. Singh, G.S. Raju, G.K. Rao, and M. Afsari. A heuristic method for feeder reconfiguration and service restoration in distribution networks. *International*



- Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31(7):309 – 314, 2009.
- [41] M. Gholami, J. Moshtagh, and F. Felegari. A new heuristic algorithm for service restoration in unbalanced distribution networks. In *2014 19th Conference on Electrical Power Distribution Networks (EPDC)*, pages 71–75, May 2014.
- [42] R.M. Ciric and D.S. Popovic. Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 22(7):497 – 505, 2000.
- [43] S. Junlakarn and M. Ilić. Distribution system reliability options and utility liability. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(5):2227–2234, Sept 2014.
- [44] J. Li, X. Ma, C. Liu, and K. P. Schneider. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(6):3021–3029, Nov 2014.
- [45] Danilo Sipoli Sanches, João Bosco A. London, Alexandre Cláudio B. Delbem, Ricardo S. Prado, Frederico G. Guimarães, Oriane M. Neto, and Telma W. de Lima. Multiobjective evolutionary algorithm with a discrete differential mutation operator developed for service restoration in distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 62:700 – 711, 2014.
- [46] M. M. R. Ibrahim, H. A. Mostafa, M. M. A. Salama, R. El-Shatshat, and K. B. Shaban. A graph-theoretic service restoration algorithm for power distribution systems. In *2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, pages 338–343, Feb 2018.
- [47] Jairo Quirós-Tortós, Peter Wall, Lei Ding, and Vladimir Terzija. Determination of sectionalising strategies for parallel power system restoration: A spectral clustering-based methodology. *Electric Power Systems Research*, 116:381 – 390, 2014.



- [48] Julio E. Romero and Alberto Vargas. Inference of operative configuration of distribution networks using fuzzy logic techniques. part i: Real-time model. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.20, N.3, August, 2005.
- [49] D. Das. Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 28(5):331 – 338, 2006.
- [50] K. Manjunath and M.R. Mohan. A new hybrid multi-objective quick service restoration technique for electric power distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29(1):51 – 64, 2007.
- [51] J. Chen and C. Chen. A neural network approach to evaluate distribution system reliability. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, 1992.
- [52] M. Mohammoud, N. Ahmed, and P. Sazali. Reliability evaluation of distribution power systems based on artificial neural network techniques. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2011.
- [53] R. Romero, J. F. Franco, F. B. Leão, M. J. Rider, and E. S. de Souza. A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(2):1259–1268, March 2016.
- [54] S. Kazemi, M. Lehtonen, and R. J. Millar. Impacts of automatic loop restoration schemes on service reliability. In *IET Conference on Reliability of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2011)*, pages 1–6, Nov 2011.
- [55] Weixing Li, Peng Wang, Zhimin Li, and Yingchun Liu. Reliability evaluation of complex radial distribution systems considering restoration sequence and network constraints. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 2, 2004.
- [56] M. Rodríguez-Montañés, J. A. Rosendo-Macías, A. Gómez-Expósito, and G. Tévar. Algebraic framework for outage information management in distri-



- bution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6):6806–6815, Nov 2018.
- [57] M. Rodríguez-Montañés, J.A. Rosendo-Macías, and A. Gómez-Expósito. A systematic approach to service restoration in distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 189:106539, Dec 2020.
- [58] R.H. Stillman. Modeling failure data of overhead distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15 (4), Oct 2000.
- [59] Z. Boor and S.M. Hosseini. Optimal placement of dg to improve the reliability of distribution systems considering time varying loads using genetic algorithm. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 2013.
- [60] A. Pregelj, M. Begovic, A. Rohatgi, and D. Novosel. On optimization of reliability of distributed generation-enhanced feeders. *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2003.
- [61] P.M. Anderson. *Power System Protection*. IEEE Press Power Engineering Series, 1999.
- [62] A. Moradi, M. Fotuhi-Firuzabad, and Rashidi-Nejad. A reliability cost/worth approach to determine optimum switching placement in distribution systems. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia and Pacific, Dalian, China*, 2005.
- [63] Naveenkumar R. Kulkarni. A review on autorecloser control methodology for improved distribution reliability. *International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 4, Issue 4, April*, 2014.
- [64] Y. Chollot, J.-M. Biasse, and A. Malot. Feeder automation improves medium voltage network operating efficiency. *CIGRE Seminar 2008: SmartGrids for Distribution, Frankfurt*, 2008.



- [65] G. Celli, E. Ghiani, F Pilo, and G.G. Soma. Reliability assessment in smart distribution networks. *Electric Power Systems Research, Elsevier*, 2013.
- [66] Yuan Liao. A nove method for locating faults on distribution systems. *Electric Power Systems Research, Elsevier*, 2014.
- [67] R. Billinton and P. Wang. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, No. 2*, 1998.
- [68] Gan Li, Honghao Wu, and Fang Wang. Bayesian network approach based on fault isolation for power system fault diagnosis. *2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON 2014) Chengdu*, 2014.
- [69] A. Shahsavari, M. Farajollahi, E. Stewart, C. Roberts, F. Megala, L. Alvarez, E. Cortez, and H. Mohsenian-Rad. Autopsy on active distribution networks: A data-driven fault analysis using micro-pmu data. In *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, Sept 2017.
- [70] C.S. Wasson. *System Engineering Analysis, Design, and Development: Concepts, Principles, and Practices, 2nd Edition*. Wiley, 2015.
- [71] Mo-Yuen Chow, L. S. Taylor, and Mo-Suk Chow. Time of outage restoration analysis in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3):1652–1658, July 1996.
- [72] Weijia Liu, Zhenzhi Lin, Fushuan Wen, C.Y. Chung, Yusheng Xue, and Gerard Ledwich. Sectionalizing strategies for minimizing outage durations of critical loads in parallel power system restoration with bi-level programming. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 71:327 – 334, 2015.
- [73] Ieee guide for electric power distribution reliability indices. *IEEE Std 1366-2003 (Revision of IEEE Std 1366-1998)*, pages 1–50, May 2004.



- [74] W. Li, P. Wang, Z. Li, and Y. Liu. Reliability evaluation of complex radial distribution systems considering restoration sequence and network constraints. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(2):753–758, April 2004.
- [75] Seyed Hasan Mirhoseini, Seyed Mehdi Hosseini, Mehdi Ghanbari, and Mehrdad Ahmadi. A new improved adaptive imperialist competitive algorithm to solve the reconfiguration problem of distribution systems for loss reduction and voltage profile improvement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55:128 – 143, 2014.
- [76] A. Skoonpong and S. Sirisumrannukul. Network reconfiguration for reliability worth enhancement in distribution systems by simulated annealing. In *2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, volume 2, pages 937–940, May 2008.
- [77] S. Yao, T. Zhao, P. Wang, and H. Zhang. Resilience-oriented distribution system reconfiguration for service restoration considering distributed generations. In *2017 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pages 1–5, July 2017.
- [78] H. Sekhvatmanesh and R. Cherkaoui. Optimal infrastructure planning of active distribution networks complying with service restoration requirements. *IEEE Transactions on Smart Grid*, pages 1–1, 2018.
- [79] Y. Xu, C. Liu, K. P. Schneider, and D. T. Ton. Placement of remote-controlled switches to enhance distribution system restoration capability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(2):1139–1150, March 2016.
- [80] G. Kjolle and K. Sand. Relrad-an analytical approach for distribution system reliability assessment. In *Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, pages 729–734, Sep. 1991.
- [81] Teng-Fa Tsao and Hong-Chan Chang. Composite reliability evaluation model



for different types of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(2):924–930, May 2003.

- [82] S. Jamali and H. Shateri. Optimal siting of recloser and sectionalizers to reduce non-distributed energy. In *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES*, 2005.
- [83] Juha Haakana, Jukka Lassila, Tero Kaipia, and Jarmo Partanen. Comparison of reliability indices from the perspective of network automation devices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, N. 3, july, 2010.
- [84] J. Resh. The inverse of a nonsingular submatrix of an incidence matrix. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 10(1):131–132, March 1963.

